



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JAAKKO POUTAMO
FAASIMUUTOSMATERIAALIEN HYÖDYNTÄMINEN AURIN-
KOENERGIAN VARASTOINNISSA
Kandidaatintyö

Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
3. joulukuuta 2018

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

POUTAMO, JAAKKO: Faasimuutosmateriaalien hyödyntäminen aurinkoenergian varastoinnissa (Utilization of phase change materials as solar energy storage)

Kandidaatintyö, 30 sivua

Joulukuu 2018

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastaja: Seppo Syrjälä

Avainsanat: faasimuutosmateriaalit, energian varastointi, aurinkoenergia, latenttinen lämpöenergiavarasto

Kasvava globaali energiankulutus ja ilmastonmuutos ajavat energiateollisuuden keksimään uusia uusiutuvia energialähteitä hyödyntäviä ratkaisuja. Yksi potentiaalinen energiamuoto on aurinkoenergia, jota jo maapallolla hyödynnetään. Yhtenä aurinkoenergian suurena ongelmana on kuitenkin aurinkoenergian varastointi matalan tuotannon aikana. Varastoinnissa voidaan kuitenkin hyödyntää erilaisia teknologioita, joista yksi on faasimuutosmateriaaleilla toteutettu latenttinen energiarasto.

Faasimuutosmateriaalit ovat orgaanisia, epäorgaanisia ja eutektisia yhdisteitä, jotka faasimuutoksen yhteydessä luovuttavat tai varastoivat suuren määrän energiaa. Faasimuutosmateriaaleilla on monia sovelluskohteita tekniikan alalla, joista yksi on latenttinen energiarasto. Tämän työn tarkoituksena onkin perehtyä faasimuutosmateriaalien mahdollisuuksiin varastoida aurinkoenergiaa. Työ on kirjallisuusselvitys ja lähteinä on käytetty useita eri tieteellisiä artikkeleita, joiden tutkimustuloksia ja päätelmiä on hyödynnetty työssä.

Ensin työssä perehdytään faasimuutosmateriaalien ominaisuuksiin ja vaatimuksiin. Faasimuutosmateriaalien luokittelun lisäksi syvennyttään toteutettuihin ja potentiaalsiin sovelluskohteisiin tekniikan alalla sekä etenkin faasimuutosmateriaalien mahdollisuuksiin toimia latenttisena lämpövarastona.

Erilaisia energiarastoja ja niiden sovelluskohteita käsitellään työssä monipuolisesti. Pääpaino on kuitenkin lämpöenergian varastoinnissa sekä etenkin latenttisessa lämpöenergian varastoinnissa. Myös aurinkoenergian yleisimpiin varastointimenetelmiin perehdytään työssä.

Työn lopussa käsitellään faasimuutosmateriaalien käyttöä sekä hyödyntämismahdollisuuksia latenttisina energiarastoina, joka on erilaisten faasimuutosmateriaalien potentiaalisin käyttökohde. Eniten faasimuutosmateriaaleja on hyödynnetty energiarastoina rakennusten lämmönsäätelyssä sekä CSP-laitoksissa tasaamaan tuotantoa ja vähentämään hukkaenergian määrää. Erilaisten toteutettujen ja kokeiltujen järjestelmien analysoinnin jälkeen perehdytään faasimuutosmateriaalien tulevaisuuteen aurinkoenergian varastoinnissa, joka näyttää hyvin teknisesti haastavalta, mutta erittäin potentiaaliselta.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	FAASIMUUTOSMATERIAALIT	2
2.1	Luokittelu	3
2.2	Tutkitut sovelluskohteet	5
3.	ENERGIAN VARASTOINTI	8
3.1	Yleisimmät varastointimenetelmät.....	8
3.1.1	Lämpöenergiavarasto	9
3.1.2	Latenttinen lämpövarasto	10
3.2	Aurinkoenergian varastointi	12
4.	FAASIMUUTOSMATERIAALIT ENERGIAVARASTOINA	16
4.1	Tekninen toteutus	16
4.1.1	Kapselointi	17
4.1.2	Muut lämmönsiirtoa ja -johtokykyä parantavat menetelmät	19
4.2	Aurinkoenergian varastointijärjestelmä	21
4.2.1	Järjestelmä CSP-voimaloissa	22
4.2.2	Järjestelmän integrointi rakennuksiin	24
4.3	Tulevaisuuden haasteet ja mahdollisuudet.....	26
5.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	28
	LÄHTEET	29

LIITE A:

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CSP	Keskittävä aurinkovoima
LCOE	Energian tasoitettujen kustannuksien hinta
LHS, LHTES	Latenttinen lämpövarasto
PCM	Faasimuutosmateriaali
SHS, SHTES	Tuntuvan lämmön varasto
TCS	Termokemiallinen lämpövarasto
TES	Lämpöenergiavarasto

1. JOHDANTO

Kasvava energiankulutus, suuret kulutuksen kausivaihtelut, kasvihuoneilmiö, ilmastopimukset ja uusiutuvien energialähteiden lisääntyminen ovat muokanneet energiajärjestelmää rajusti. Uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko- ja tuulienergian integroiminen nykyiseen energiantuotantojärjestelmään on hankalaa niiden epätasaisen ja arvaamattoman tuotannon vuoksi. Esimerkiksi aurinko ei paista yöllä ja puolestaan kesällä ilmenee huomattavasti enemmän vähätuulisia päiviä kuin talvella. Jos päästöttömiä uusiutuvia energialähteitä halutaan hyödyntää tulevaisuudessa energiantuotannossa, täytyy energiaa varastoida tehokkaasti talteen, kun kulutus on pienempää kuin tuotanto.

Auringon säteilystä saatava energiamäärä on monissa paikoissa maapallolla hyvin suuri, joten aurinkoenergiassa on paljon potentiaalia vielä suuremmaksi energialähteeksi, mutta nykyiseen teknologiaan liittyy paljon ongelmia. Yhtenä ongelmana aurinkokeräimien kehittämisen lisäksi on aurinkoenergian varastointi, johon tällä hetkellä yksi potentiaalinen vaihtoehto on faasimuutosmateriaalien hyödyntäminen [1].

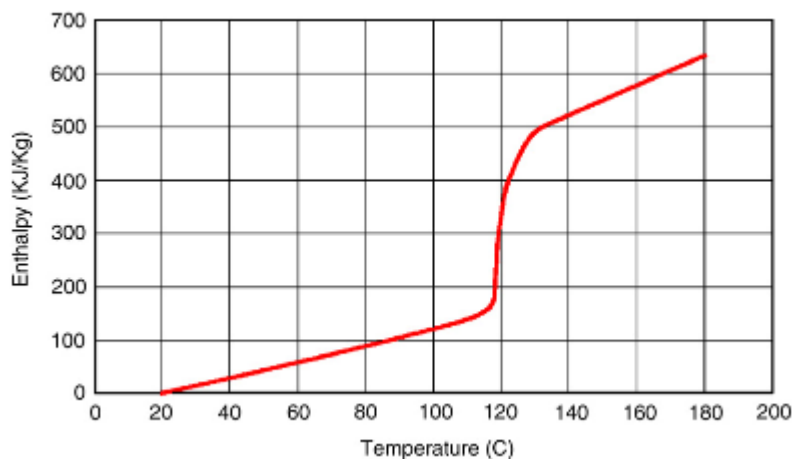
Faasimuutosmateriaalit ovat erilaisia materiaaleja, jotka luovuttavat tai varastoivat suuren määrän energiaa faasimuutoksessa. Kyseiset materiaalit toimivatkin erinomaisena lyhytaikaisena latenttisenä lämpöenergiavarastona ja niiden avulla voidaan jäähdyttää ja lämmittää esimerkiksi rakennuksissa huoneilmaa. Toistaiseksi faasimuutosmateriaaleja käytetään muun muassa rakennuksien lämmönsäätelyssä, elektroniikassa ja vaatetuksessa. Puolestaan faasimuutosmateriaalien hyödyntämismahdollisuuksia aurinkoenergian varastointijärjestelmissä on aloitettu tutkimaan viime aikoina enemmän muuttuvan energiajärjestelmän vuoksi. [2] Työn tavoitteena on tutkia kirjallisuudesta, miten faasimuutosmateriaalit toimivat latenttisinä energiavarastoina aurinkoenergian varastoinnissa sekä analysoida energiavarastojärjestelmien teknistä toteutusta, tulevaisuutta ja nykytilaa.

Työn ensimmäisessä luvussa perehdytään yleisesti faasimuutosmateriaalien ominaisuuksiin, luokitteluun sekä sovelluskohteisiin. Syvempää analyysia yksittäisistä faasimuutosmateriaaleista ei työssä esiinny, mutta työn viimeisessä luvussa analysoidaan mitkä aineet sopisivat parhaiten aurinkoenergiavarastoihin. Toisessa luvussa käydään läpi energian varastoinnin erilaisia ratkaisuja, latenttisen lämpöenergiavaraston toimintaperiaatteita sekä aurinkoenergian varastoinnin yleisiä periaatteita. Kolmannessa luvussa perehdytään tarkemmin faasimuutosmateriaaleilla toteutettaviin aurinkoenergiavarastojärjestelmiin. Kyseisessä luvussa paneudutaan lisäksi faasimuutosmateriaalien termisten ominaisuuksien parantamismetodeihin sekä energiavarastojärjestelmän integroimiseen rakennuksiin. Viimeinen luku kokoaa työn tärkeimmät havainnot ja päätelmät yhteen.

2. FAASIMUUTOSMATERIAALIT

Faasimuutosmateriaalit (phase change materials, lyh. PCM) ovat materiaaleja, jotka pysyvät vapauttamaan tai varastoimaan suuren määrän energiaa faasimuutoksen yhteydessä. Energia vapautuu faasimuutosmateriaaleissa lämpöenergiana faasimuutoksessa, joten kyseisiä materiaaleja hyödynnetään hyvin paljon erilaisissa teknologisissa käyttökohteissa. Faasimuutosmateriaalien yleisin sovelluskohde onkin lämpövarasto, jolloin puhutaan latenttisesta lämpövarastosta. [2, s. 10]

Faasimuutosmateriaalien hyödyntäminen lämpövarastona perustuu vapautuvaan tai sitoutuvaan energiaan faasimuutoksessa. Täten faasimuutosmateriaalit luokitellaan latenttisiksi lämpövarastoiksi. Yleisesti ottaen faasimuutosmateriaalien sulamislämmöt kiinteän ja nestemäisen faasin välillä ovat 100–300 kJ/kg. [2, s. 10] Kuvaaja 1 osoittaa, kuinka faasimuutosmateriaalina käytetty erytritoli sitoo lämpöenergiaa noin 330 kJ/kg lämpötilan noustessa vain 10 celsiusastetta.



Kuvaaja 2.1 Faasimuutosmateriaalin (erytritoli) entalpian nousu faasimuutoksessa [1]

Jokainen aine luovuttaa tai varastoi energiaa faasimuutoksessa, mutta kun halutaan hyödyntää faasimuutosmateriaaleja latenttisina lämpövarastoina, tulee seuraavia ominaisuuksia priorisoida:

- korkea sulamis- ja ominaislämpö massa- ja tilavuusyksikköä kohden
- sovelluskohteeseen sopiva sulamislämpötila
- matala höyrynpaine (alle 1 bar) toimintalämpötilassa
- kemiallisesti stabiili sekä korrosoimaton aine
- ei-myrkyllinen tai -haitallinen, eikä helposti syttyvä
- korkea lämmönjohtokyky
- helposti saatavilla sekä halpa

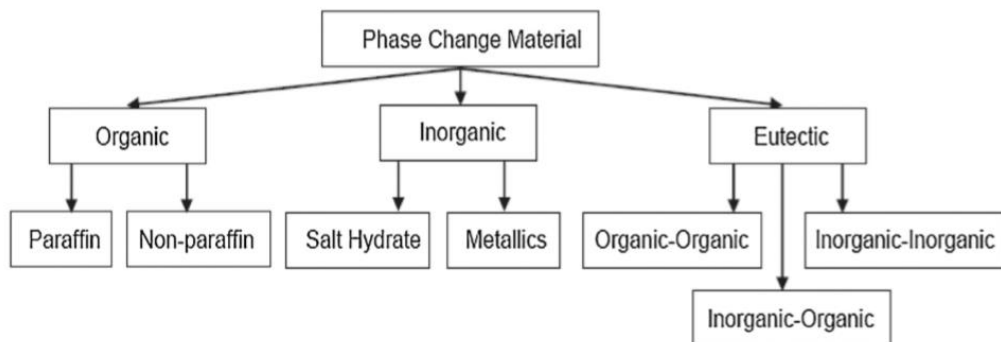
- muuttumaton tilavuus faasimuutoksessa
- alhainen alijäähtymisaste ja nopea kiteytyminen
- uudelleenkiteytymisen ilman ominaisuuksien huonontumista [1]

Harva faasimuutosmateriaali pystyy yksittäisenä aineena täyttämään kaikki edellä mainitut kriteerit käytännössä. Monesti faasimuutosmateriaalien sovelluskohteissa käytetään useita faasimuutosmateriaaleja sekä muita lämmönsiirtopintoja ja materiaaleja. [2]

Faasimuutosmateriaalien yleisimpiä ongelmia ovat niiden kalliit hinnat sekä huono lämmönjohtokyky. Monien faasimuutosmateriaaleilla toteutettujen lämpöenergiavarastojen kustannukset nousevat helposti korkeiksi järjestelmien monimutkaisuuden sekä hintavien materiaalien vuoksi. Lämmönjohtokyky faasimuutosmateriaaleilla on puolestaan normaalisti luokkaa 0,15–0,70 W/mK, mikä rajoittaa niiden käyttöä esimerkiksi aurinkoenergian varastointijärjestelmissä [1]. Tähän ongelmaan pyritään vaikuttamaan erilaisilla teknisillä ratkaisulla, kuten kapseloinnilla, muovaamisella sekä muiden aineiden lisäämisellä faasimuutosmateriaalin sekaan [3].

2.1 Luokittelu

Kirjallisuudessa faasimuutosmateriaalit luokitellaan kolmeen eri luokkaan niiden kemiallisten ominaisuuksien perusteella: orgaaniset ja epäorgaaniset faasimuutosmateriaalit sekä eutektiset seokset [4]. Myös kaupallisia faasimuutosmateriaaleja pidetään yhtenä yleisenä luokkana.



Kuva 1.1 Faasimuutosmateriaalien luokittelu [4].

Orgaaniset faasimuutosmateriaalit koostuvat parafiineista sekä aineista, joita ei voi luokitella parafiineiksi, kuten esimerkiksi rasvahapot, esterit, alkoholit ja glykolit. Orgaaniset aineet ovat suosittuja niiden halvan hinnan [1] ja hyvän saatavuuden vuoksi. Parafiinien sulamispisteet vaihtelevat välillä 20–70 celsiusastetta ja niiden lämmönjohtokyky on vain 0,2 W/mK luokkaa. Tämän lisäksi niiden tilavuus muuttuu paljon faasimuutoksen aikana, mikä ei ole hyvä ominaisuus. Parafiinivahat ovat puolestaan käytetyimpiä kaupallisia faasimuutosmateriaaleja. [4]

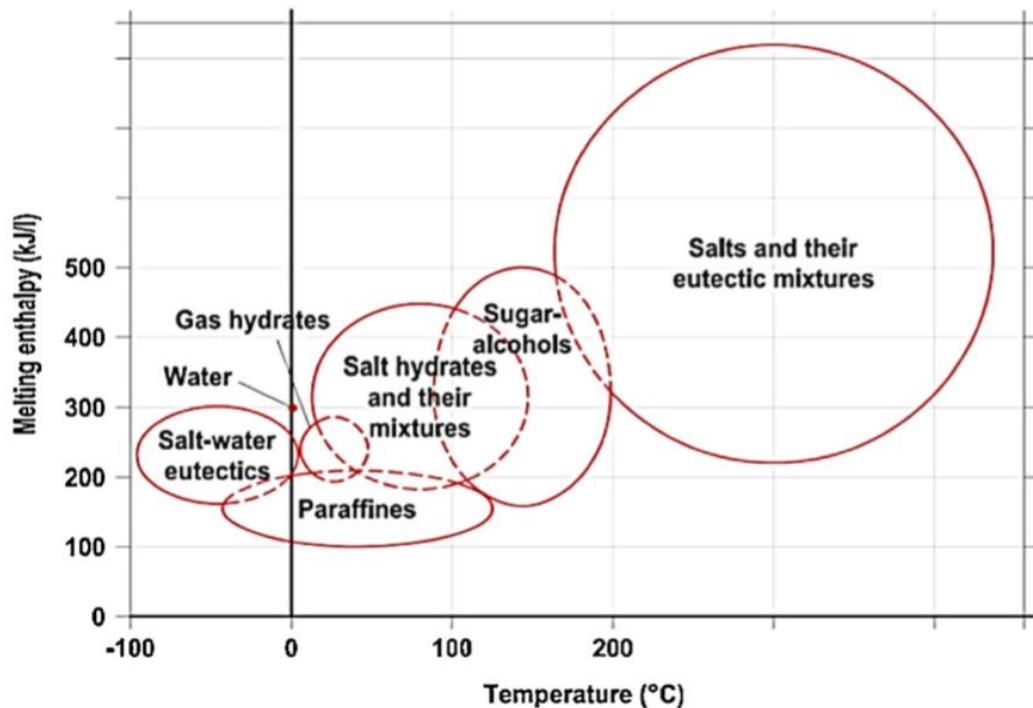
Epäorgaaniset materiaalit jaetaan myös kahteen eri alaluokkaan: suolahydraatit ja metallit. Suolahydraatit, joiden kemiallinen kaava on muotoa $AB \times nH_2O$ [2], ovat käytetyimpiä faasimuutosmateriaaleja etenkin lämpöenergiavarastoissa [1] suolahydraattien tiheyden ja energian varastointitehokkuutensa vuoksi [3]. Metallisia faasimuutosmateriaaleja käytettäessä puolestaan korroosion riski kasvaa, mikä vaikeuttaa kyseisten materiaalien käyttöä. Yleisesti ottaen epäorgaanisilla faasimuutosmateriaaleilla on suhteellisen hyvä lämmönjohtokyky ja korkea sulamislämpö. [4]

Taulukko 2.1 Orgaanisten ja epäorgaanisten faasimuutosmateriaalien yleisiä ominaisuuksia [5]

Property	Rock	Water	Organic PCM	Inorganic PCM
Density, kg/m ³	2240	1000	800	1600
Specific heat, kJ/kg	1.0	4.2	2.0	2.0
Latent heat, kJ/kg	–	–	190	230
Latent heat, kJ/m ³	–	–	152	368
Storage mass for 10 ⁶ J, kg	67,000	16,000	5300	4350
Storage volume for 10 ⁶ J, m ³	30	16	6.6	2.7
Relative storage mass	15	4	1.25	1.0
Relative storage volume	11	6	2.5	1.0

Vesi on tunnetusti erittäin hyvä lämpövarasto, ja sitä käytetään monessa energiaratkaisussa sen faasimuutosentalpioita hyödyntäen. Korkea ominaislämpö ja höyrystymisentalpia (n. 333 kJ/kg) tekevät vedestä erinomaisen energian varastointiaineen. Veden etuna on myös sen runsas saatavuus ja edullinen hinta. Myös kiveä on alettu hyödyntämään lämpövarastona, mutta tällaisissa energiavarastoissa ei kiven faasimuutosta tapahdu. Vertahtaessa faasimuutosmateriaaleja esimerkiksi veteen huomataan materiaalien energian varastointikapasiteetin oleva huomattavasti parempi. Energiaa saadaan varastoitua pienempään tilavuuteen hyödynnettäessä faasimuutosmateriaaleja, mikä helpottaa huomattavasti varastojen integrointia vaikeampiinkin paikkoihin. Orgaanisten ja epäorgaanisten faasimuutosmateriaalien välillä merkittävimpana erona on puolestaan niiden tiheyksien keskiarvot. Epäorgaaniset faasimuutosmateriaalit ovat huomattavasti tiheämpiä aineita, mikä mahdollistaa muun muassa suolahydraattien käytön monissa eri sovelluskohteissa.

Kolmas pääluokka faasimuutosmateriaalien luokittelussa on eutektiset seokset. Näillä tarkoitetaan kiinteiden aineiden tietynlaisia seoksia, joilla pyritään tuomaan juuri tiettyjä ominaisuuksia esille. Eutektisilla seoksilla pyritään esimerkiksi nostattamaan materiaalin latenttilämpöä tai tarkentamaan sen sulamispistettä [4], jotka helpottavat faasimuutosmateriaalin käyttöä spesifisempiin käyttökohteisiin. Eutektisen seoksen osat eivät erotu toisistaan aineen sulaessa tai jähmettyessä [4], mikä helpottaa kyseisten aineiden pitkäaikaista käyttöä.



Kuva 2.2 Eri faasimuutosmateriaaliryhmien sulamisentalpioita ja -lämpötiloja [4]

Energiavarastoja hyödynnetään erilaisissa käyttökohteissa, joten niiden toimintalämpötilat vaihtelevat suuresti. Faasimuutosmateriaalit tarjoavat ratkaisun erilaisiin toimintalämpötiloihin lukuisilla sulamislämpötiloillaan ja muilla monipuolisilla ominaisuuksillaan. Kuten kuvasta 2.2 huomataan, suolahydraatit vievät suurimman alan kaaviosta ja täten ovatkin niiden monipuolisuuden vuoksi käytetyimpiä faasimuutosmateriaaleja. Parafiinien sulamislämpötilojen vaihtelevuus on myös hyvin laaja ja niitä käytetäänkin paljon mm. aurinkoenergian sovelluksissa niiden suuren tuotantokapasiteetin vuoksi.

Energiavarastojen merkityksen kasvaessa maapallolla faasimuutosmateriaaleja valmistavien yritysten määrä on kasvanut viime vuosikymmenien aikana kovasti. Alan kaupallisia tuotteita ovat muun muassa faasimuutosmateriaalit, erilaiset kapselit, paneelit ja lämmönsiirtopinnat sekä lämpövarastosäiliöt [1].

Suurimpia yrityksiä alalla ovat tällä hetkellä parafiineja valmistava saksalainen Rubitherm, epäorgaanisia suoloja valmistavat ruotsalainen Climator, australialainen TEAP energy ja englantilainen EPS ltd [2]. Suomessa tai Pohjoismaissa ei faasimuutosmateriaaleja valmistavia yrityksiä toistaiseksi ole esiintynyt.

2.2 Tutkitut sovelluskohteet

Faasimuutosmateriaalien sovelluskohteita ja hyödyntämismahdollisuuksia on tutkittu paljon eri aloilla. Materiaaleja voidaan hyödyntää tällä hetkellä esimerkiksi rakennustek-

niikassa, jäähdyttimissä, elektroniikassa, energian varastoinnissa, tekstiileissä ja vaate-
tuksessa. Myös polttomoottoreissa sekä ruoan valmistuksessa ja säilytyksessä on alettu
käyttämään faasimuutosmateriaaleja. Tekniikka on kantautunut jopa avaruuteen asti, sillä
satelliiteissa on alettu testaamaan faasimuutosmateriaaleja aurinkosähkövoimajärjestel-
mässä [5]. [2, s.54]

Potentiaalisin sovelluskohde faasimuutosmateriaaleille tekniikan alalla on latenttinen
energiavarasto. Eniten latenttisia energiavarastoja on tutkittu rakennuksissa, joissa
faasimuutosmateriaalien avulla voitaisiin jäähdyttää ja lämmittää huoneilmaa. Rakennuk-
siin integroitu PCM-järjestelmä hyödyntää aurinkoenergiaa jatkuvasti rakennuksen ener-
gian tuotannossa, pyrkii tasaamaan kulutuksen vaihteluita ja takaa tasapainoisen lämmön
kausivaihteluista huolimatta siten, että jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmät eivät kuormitu.
Rakennuksissa faasimuutosmateriaaleja voidaan käyttää osana rakenteita, esimerkiksi
seinissä, lattioissa tai katoissa. [6]

Elektroniikassa faasimuutosmateriaalien avulla mobiililaitteiden jäähdytys on ollut yksi
lupaavimmista käyttökohteista. Faasimuutosmateriaaleilla toteutettu jäähdytysjärjes-
telmä esimerkiksi älypuhelimissa toimisi hyvin, sillä jäähdytysjärjestelmä olisi kooltaan
hyvin pieni. Mobiililaitteisiin sopii huonommin perinteinen konvektioon perustuva kook-
kaampi jäähdytysjärjestelmä, joten faasimuutosmateriaaleilla on potentiaalia tälläkin osa-
alueella. Parafiinivahan (sulamispiste 55 °C) käyttöä on tutkittu mobiililaitteen jäähdytys-
levyssä ja kyseinen tutkimus osoitti, että jäähdytys on mahdollista kyseisen faasimuutos-
materiaalin avulla. [2]

Jäähdytyksen lisäksi faasimuutosmateriaaleja voidaan käyttää elektroniikassa kompo-
nenttien lämpösuojaukseen [2]. Esimerkiksi avaruudessa käytettävät järjestelmät, lähe-
tystornien suojarakennuksen ja mobiililaitteiden komponentit ovat käytännöllisiä kohteita
PCM-lämpösuojaukselle.

Hieman vanhempi elektroniikan käyttökohde faasimuutosmateriaaleille on datan varas-
tointi, missä hyödynnetään faasimuutosmateriaalien optisia ja sähköisiä ominaisuuksia.
Näitä ominaisuuksia käytetään muun muassa päällekirjoitettavissa optisissa data- ja me-
diavarastoissa, joissa faasimuutos materiaalissa tapahtuu amorfisen ja kiteisen muodon
välillä. Esimerkiksi päällekirjoitettavat Blue ray -levyt perustuvat tähän teknologiaan. [7]

Faasimuutosmateriaaleja voidaan hyödyntää vielä arkisemmissakin käyttökohteissa kuin
energiavarastoissa tai elektroniikassa, nimittäin vaatetuksessa. Kylmissä ja kuumissa olo-
suhteissa ihmisen kehon lämpötila tulisi pitää vaatteilla mahdollisimman tasaisena, joten
faasimuutosmateriaaleilla on potentiaalia parantaa vaatetuksen lämpöeristystä tai jäähdy-
tysominaisuuksia [5]. Eli kylmissä olosuhteissa materiaali jakaa ja vapauttaa lämpöä ja
puolestaan kuumassa tai fyysisen aktiviteetin aikana materiaali absorboi lämpöä itseensä.
Vaatteissa faasimuutosmateriaaleja on lisätty kuitujen, kankaiden tai vaahtojen sekaan
erilaisilla menetelmillä parantamaan vaatteen termofysikaalisia ominaisuuksia [2].

Vaatetuksessa faasimuutosmateriaalin faasimuutoslämpötilan tulisi olla välillä 18 – 35 °C. Parafiinivahat soveltuvatkin parhaiten vaatteisiin niiden vaatetukseen sopivan sulamislämpötilan [8], korkean sulamislämmön, kemiallisen inerttiyden ja myrkyttömyyden vuoksi [2]. Faasimuutosmateriaaleja käytettäessä vaatetuksessa on otettava huomioon vaatekappaleen massan kasvu, paksuus, lujuuden ja joustavuuden muutokset sekä ilman ja veden läpäisykyky. Tämä tekee teknologian hyödyntämisestä vaatetuksessa vaikeaa.

Vaihtoehtoisia käyttö- ja sovelluskohteita faasimuutosmateriaaleille löytyy hyvin paljon. Monipuoliset ominaisuudet ja toimintaolosuhteet, teknisten ratkaisujen hyödyntäminen ja materiaalien sekoittaminen keskenään mahdollistavat miltei loputtomat sovelluskohdet niille. Pienemmän mittakaavan sovelluksia löytyykin siis paljon, mutta suuremman kokoluokan hankkeita, kuten järjestelmien integroimista osaksi voimalaitosta tai valtakunnallista sähköverkkoa, ei ole vielä lanseerattu.

3. ENERGIAN VARASTOINTI

Energia-ala on murroksessa uusiutuvien energialähteiden ottaessa suurempaa jalansijaa energiantuotannossa. Myös kulutus ja kulutuksen kausivaihtelu kasvaa globaalisti kovaa vauhtia, mikä muuttaa energiajärjestelmää. Muuttuviin tilanteisiin on reagoitava ja energiatekniikalla on edessään suuria haasteita, jotta tuotanto pystyy kattamaan kulutuksen joka hetkellä vuoden ympäri.

Energian varastoinnin tarve on kasvanut kovasti viimeisen 20-30 vuoden aikana, sillä esimerkiksi aurinko- ja tuulivoiman tuottama energia ei ole tasaista vuoden jokaisena päivänä. Suurimpiin kulutuspiikkeihin on osattava varautua, jotta kustannukset eivät pääse kohoamaan liikaa ja omaa tuotantoa pystytään hyödyntämään myös suurimmissa kulutushuipuissa. Muun muassa tästä syystä energian varastointi on tullut tärkeämmäksi yhteiskunnassamme. Kun kuluttamatonta energiaa varastoidaan energiavarastoihin, pystytään selviytymään suurista kulutushuipuista omalla tuotannolla energiavarastojen avulla.

3.1 Yleisimmät varastointimenetelmät

Energiavarastot eivät ole uusi keksintö, sillä esimerkiksi akut ovat olleet jo yli sadan vuoden ajan ihmisten käytössä. Akkujen lisäksi erilaisia varastointitekniikoita on luotu optimoimaan energiankulutusta sekä tekemään toiminnasta taloudellisempaa ja ekologisempaa. Kehitetyt energian varastointitekniikat voidaankin jakaa mekaanisiin, sähköisiin, kemiallisiin ja lämpöenergiavarastoihin [9].

Mekaniikkaan perustuvissa energiavarastossa mekaaninen energia voidaan varastoida esimerkiksi paineistettuun ilmaan, veden potentiaalienergiaan tai vauhtipyörään. Näistä ylivoimaisesti käytetyin tekniikka on kahdesta vesialueesta koostuva pumppulaitos (Pumped hydro energy storage, PHES), jossa matalan kulutuksen aikana vesi pumpataan ylempään altaaseen ja energiaa vapautettaessa vesi valuu alempaan altaaseen pyörittäen samalla sähköä tuottavaa generaattoria. Puolestaan vauhtipyörää sovelletaan muun muassa kulkuvälineissä jarrutusenergian varastoimiseen ja paineilmaparastoa (Compressed air energy storage, CAES) käytetään maakaasuvoimaloiden yhteydessä. [9]

Sähköenergiaa varastoidaan perinteisesti akkuihin, jotka ovat väistämätön osa jokaisen ihmisen elämää 2010-luvulla. Samalla periaatteella toimivia akkuja käytetään isommasakin mittakaavassa, nykyään enemmässä määrin muun muassa sähkö- ja hybridiautoissa. Akkutekniikassa on käytetty muun muassa lyijy, nikkeli, Natrium-rikki ja litiumakkuja [9]. Uusimpina sovelluksina akuissa on aloitettu hyödyntämään suprajohtavia materiaaleja (Superconducting magnetic energy storage, SMES) vähentämään häviöitä, parantamaan hyötysuhdetta sekä nopeuttamaan energian purkamista akusta. Toistaiseksi akut ovat yleisin varastointimenetelmä aurinkoenergiassa. [10]

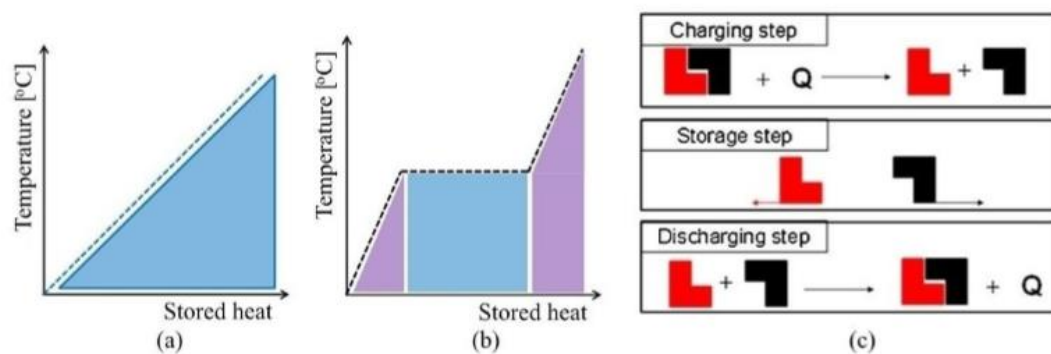
Polttokennot ovat yleisin ja kuuluisin tapa säilöä kemiallista energiaa ja vapauttaa se sähköenergiana erilaisissa sovelluskohteissa. Polttokennoilla voidaan mahdollisesti korvata bensiinikäyttöiset ajoneuvot korvaamalla moottori vetypoltttokennoilla, mutta vedyn kuljetuksen ja varastoinnin ongelmat pidättävät vetyautojen määrän räjähtävää kasvua [9].

3.1.1 Lämpöenergiavarasto

Lämpöenergiavarastot (thermal energy storage, TES) varastoivat lämpöenergiaa lämmitämällä tai viilentämällä varaston sisältöä, jotta kyseinen energia voidaan käyttää myöhemmin lämmittämiseen tai viilentämiseen. Lämpöenergiavarastoja käytetään paljon teollisuudessa ja rakennuksissa. [11, s.1]

Erilaisia lämpöenergiavarastoja voidaan vertailla keskenään tiettyjen ominaisuuksien perusteella. Eri energiavarastot kilpailevat keskenään muun muassa varastoidun energian hinnasta (€/kWh, €/kW), varaston kapasiteetista ja tehosta, eli kuinka nopeasti varasto latautuu tai purkautuu. Lämpöenergiavaraston tehokkuus puolestaan kuvaa kuinka paljon varaston kapasiteetti heikkenee yhden syklin aikana. Myös varastojen lataus- ja purkautumisaikoja sekä varastoinnin maksimikeston kapasiteettia vertaillaan [11, s. 2].

Lämpöenergiavarastojärjestelmät voidaan jakaa karkeasti kolmeen osaan: tuntuvan lämmön varastoihin (sensible heat storage, SHS), latenttisiin lämpövarastoihin (latent heat storage, LHS) sekä termokemiallisiin lämpövarastoihin (thermo chemical storage, TCS) [11, s.3]. Jako perustuu lämpöenergian varastointimenetelmään ja sen ominaisuuksiin.



Kuva 3.1 Lämpöenergiavarastojen varastointimenetelmät. (a) SHS (b) LHS (c) TCS [11, s. 4]

Tuntuvan lämmön varastoinnissa siirtyvän lämpöenergian määrä perustuu varastointiaikseen lämpötilan vaihteluun ΔT , massaan m sekä ominaislämpökapasiteettiin c_p .

$$Q = c_p m \Delta T \quad (3.1)$$

Kyseiset lämpövarastot ovat yksinkertaisimpia ja edullisimpia, sillä varastointiaineena käytetään esimerkiksi vettä. Tuntuvan lämmön lämpövarastoja käytetään esimerkiksi veden lämmittämässä ja rakennuksien passiivisessa lämmityksessä. [11, s. 4]

Eniten termokemiallisia varastoja hyödynnetään fotosähköisissä ja valokemiallisissa sovelluksissa, kuten aurinkokennoissa. Nämä lämpövarastot perustuvat reversiibleihin endo- ja eksotermisiin kemiallisiin reaktioihin, kuten kaava 3.2 osoittaa. Siirtyvän energian määrää voidaan säädellä paineen, lämpötilan ja reaktioaineiden (A, B, C) määrän vaihteluilla. [11], [12]



Esiteltyjä lämpövarastotyyppäjä käytetään paljon erilaisissa sovelluskohteissa, niiden vaihteleviin ominaisuuksiin perustuen. Esimerkiksi SHS -tekniikkaa käytetään paljon suuremman mittaluokan sovelluksissa sen edullisen hinnan, suuren tehon ja varastointiajan vuoksi. Puolestaan TCS -tekniikkaa on toistaiseksi hyödynnetty vasta pilottihankkeissa sen kompleksisuuden ja korkean hinnan vuoksi, vaikka tekniikasta löytyy paljon potentiaalia korkeiden varastointitiheyden ja hyötysuhteen vuoksi [11], [12]. Taulukko 3.1 vertailee kolmen erilaisen lämpöenergiavaraston perusominaisuuksia.

Taulukko 3.1 Lämpöenergiavarastojen vertailua [11].

TES System	Capacity (kWh/t)	Power (MW)	Efficiency (%)	Storage Period	Cost (€/kWh)
Sensible (hot water)	10–50	0.001–10.0	50–90	days/months	0.1–10
Phase-change material (PCM)	50–150	0.001–1.0	75–90	hours/months	10–50
Chemical reactions	120–250	0.01–1.0	75–100	hours/days	8–100

3.1.2 Latenttinen lämpövarasto

Kolmas lämpöenergiavaraston pääluokka on latenttinen lämpövarasto (LHS). Näiden lämpövarastojen lämmönsiirto perustuu varastointiaineen faasimuutoksessa vapautuvaan tai varastoituvaan lämpöenergiaan, eli latenttiseen energiaan [9]. Siirtyvä energiamäärä Q jouleissa latenttisessa lämpövarastossa, voidaan laskea kaavalla

$$Q = \int_{t_i}^{t_m} mc_p dt + mf\Delta q + \int_{t_m}^{t_f} mc_p dt \quad (3.3)$$

jossa t_m on sulamislämpötila, m on varastointimateriaalin massa, c_p on materiaalin ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa, f on sulavan materiaalin osuus kokonaismassasta, Δq on sulamislämpö, t_i on alkulämpötila ja t_f on loppulämpötila [11, s. 10]. Suurin osa lämmöstä siirtyy itse faasimuutoksessa, eikä lämpötilan muutoksessa.

Latenttisissa lämpövarastoissa käytettäviä aineita kutsutaan faasimuutosmateriaaleiksi. Ne luovuttavat tai varastoivat suuren määrän energiaa faasimuutoksen yhteydessä ja siksi

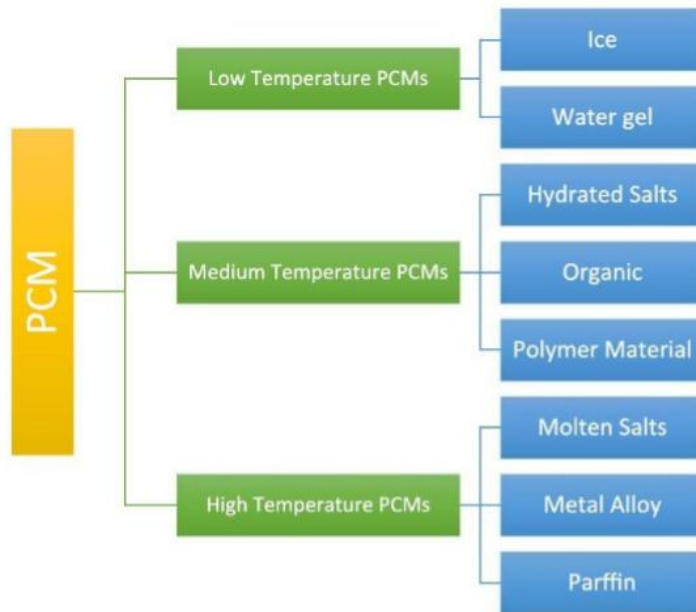
ne soveltuvat parhaiten latenttisiin lämpövarastoihin. Faasimuutosmateriaaleihin perehdyttiin enemmän luvussa 2.

Suurin ero latenttisen ja tuntevan lämmön lämpövarastojen välillä on se, että latenttisisä lämpövarastossa lämpötila pysyy miltei samana. Latenttisen ja tuntevan lämmön lämpövarastoissa käytetyt aineet käyttäytyvät muuten hyvin samalla tavalla keskenään [11, s. 10]. Latenttinen lämpövarasto pystytään kuitenkin toteuttamaan huomattavasti pienemässä koossa kuin tuntevan lämmön varasto, sillä faasimuutosmateriaaleilla on normaalisti suuri energiatiheys [12]. Myös yhtenä suurimpana latenttisen lämpövaraston etuna on se, että hyödyntämällä erilaisia faasimuutosmateriaaleja ja niiden sekoituksia, pystytään energiavaraston toiminta- ja faasimuutoslämpötila muovaamaan juuri sopivaksi sovelluskohteelle. Tämä on kuitenkin monimutkaista ja vaatii paljon tietoa erilaisista aineista ja niiden ominaisuuksista.

Latenttiset lämpövarastot jaetaan vielä kolmeen osaan: kiinteä-kiinteä, neste-kaasu ja kiinteä-neste. Kiinteä-kiinteä -lämpövarastoissa faasimuutoksella tarkoitetaan muutosta erilaisten kiteisten muotojen välillä. Näiden energiavarastojen hyvänä ominaisuutena pidetään hyvin pientä tilavuuden muutosta faasimuutoksen aikana. Kuitenkin yleisin latenttinen lämpövarasto on kiinteä-neste -varastot, sillä kiinteä-kiinteä -varastojen latenttienergian muutos on huomattavasti pienempi [13]. Puolestaan neste-kaasu -varastojen latenttilämpö on suuri, mutta varastoinnissa on suuria ongelmia tilavuuden vaihtelun vuoksi. [11, s. 11]

On olemassa kolme ominaisuutta, jotka latenttisen lämpövaraston on omattava, jotta se toimisi halutulla tavalla. Ensinnäkin varaston sisältämän faasimuutosmateriaalin sulamispisteen on oltava lähellä ympäristön lämpötilaa. Tämän lisäksi materiaalin säiliön on oltava oikean kokoinen ja sopiva faasimuutosmateriaalia varten, eli mahdolliset tilavuuden muutokset on otettava huomioon. Myös lämmönsiirtopinta-alat ovat osattava optimoida ja suunnitella oikein ottaen huomioon materiaalin ominaisuudet, säiliön materiaali ja muodot sekä varaston käyttötarkoitus ja paikka. [11, s.11]

Käyttökohteita latenttisille lämpövarastoille on monia, koska erilaisten faasimuutosmateriaalien avulla voidaan asettaa lämpövaraston toimintalämpötila juuri sopivaksi. Mikäli lämpövarastoa käytetään rakennuksien lämpötilan säätöön, täytyy rakennuksen materiaaleihin integroidun faasimuutosmateriaalin faasimuutoksen tapahtua välillä 22-25 °C. Jäähdytyslaitoksen lämpövaraston toimintalämpötila tulee olla välillä 7-15 °C ja lämmitysvoimassa 40-50 °C. Lisäksi yksi potentiaalinen sovelluskohde latenttisille lämpövarastoille on aurinkovoiman avulla jäähdyttäminen tai lämmittäminen, jolloin faasimuutosmateriaalin sulamispisteen on oltava välillä 80-90 °C. Faasimuutosmateriaalit voidaankin jakaa kolmeen osaan niiden sulamispisteen mukaan, kuten kuva 3.2 osoittaa. [11]



Kuva 3.2 Faasimuutosmateriaalien kategorisointi sulamispisteen perusteella. [11, s. 15]

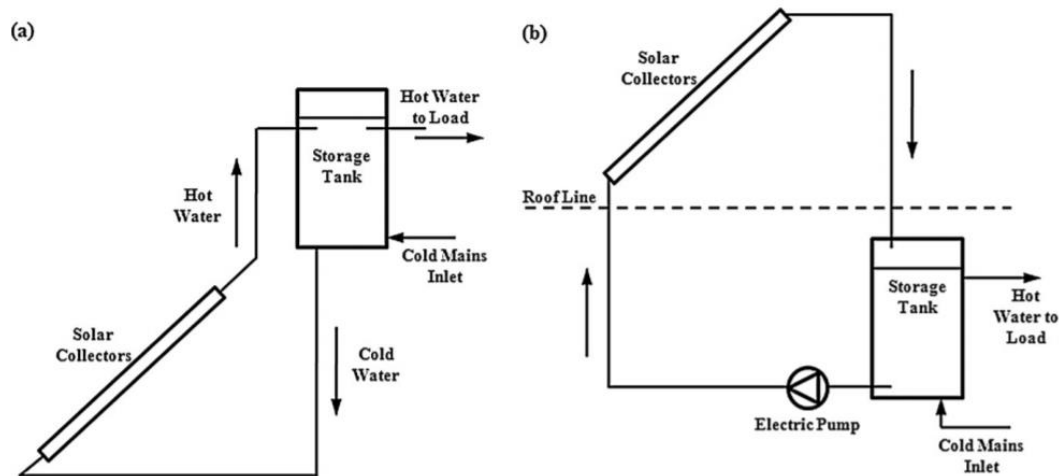
3.2 Aurinkoenergian varastointi

Aurinkoenergiaa voidaan varastoida joko sähkö- tai lämpöenergiana. Aurinkosähköenergian varastointiin ylivoimaisesti käytetyin menetelmä on erilaisten akkujen käyttö [10]. Akkujen lisäksi aurinkosähköä voi varastoida mekaanisesti muun muassa pumppuvoimalaitoksiin ja vauhtipyöriin sekä kemiallisesti esimerkiksi polttokennoihin. Tässä työssä perehdytään ainoastaan auringon lämpöenergian varastointiin. Ei kuitenkaan ole olemassa yhtä oikeaa tapaa varastoida aurinkoenergiaa, sillä eri menetelmät sopivat eri olosuhteisiin ja käyttötarkoituksiin [10].

Aurinkolämpöenergian varastointimenetelmät voidaan jakaa varastointimekanismin mukaan kolmeen eri lämpöenergiavarastoinnin kategoriaan, eli tuntevan ja latenttisen lämmön varastointiin sekä termokemiallisen lämmön varastointiin. Jako voidaan lisäksi tehdä passiivisen ja aktiivisen varastoinnin välillä. Tämän lisäksi aktiiviset aurinkoenergiavarastot voidaan jakaa vielä välillisiin ja välittömiin varastoihin. Välillisissä lämpövarastoissa kiertävä lämmönsiirtoaine kiertää suljetussa systeemissä aurinkokennon kautta. Välittömässä eli avoimessa silmukassa lämmönsiirtoaineet sekoittuvat keskenään. [14]

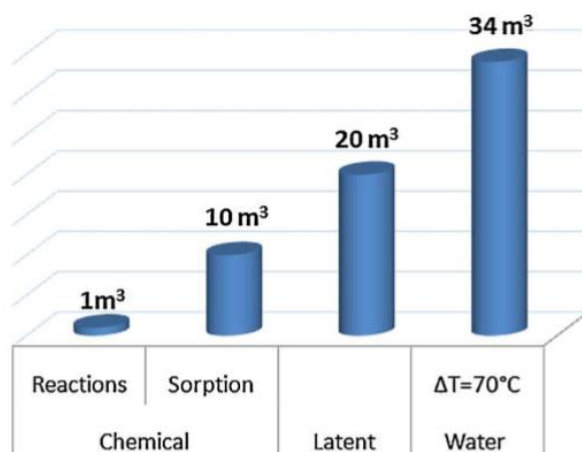
Passiivisessa aurinkoenergian varastointijärjestelmässä lämmönsiirtoaine kulkee systeemissä itse lämpövaraston läpi luovuttaen tai ottaen vastaan lämpöenergiaa varastointiaineeilta. Aktiivinen varastointijärjestelmä puolestaan perustuu pakotettuun konvektioon, jolloin varastointiaine kiertää myös systeemissä. Molemmissa järjestelmissä voi käyttää lämmönsiirtoaineena kiinteää tai nestemäistä ainetta, faasimuutosmateriaalia tai kemiallisen reaktion reagenssia. Aktiivista ja passiivista aurinkoenergian varastointijärjestelmää

ei tule sekoittaa passiivisiin ja aktiivisiin aurinkolämpöjärjestelmiin. Kuvan 3.3 osoittamalla tavalla aktiivinen aurinkolämpöjärjestelmä eroaa passiivisesta siten, että systeemissä kiertävä lämmönsiirtoaine liikkuu pumpun eikä tiheysgradientin avulla. [14]



Kuva 3.3 Tyypillinen (a) passiivinen ja (b) aktiivinen aurinkolämpöjärjestelmä. [14]

Kun vertaillaan kolmea auringon lämpöenergian varastointitekniikkaa, huomataan, että tuntevan lämmön varastointitekniikat ovat huomattavasti yleisimpiä [14]. Tähän suurimpana syynä on varmasti se, että tuntevan lämmön varastointiaineet, kuten vesi, kivi sekä maaperä ovat huomattavasti halvempia materiaaleja kuin saatavilla olevat faasimuutosmateriaalit ja lämpöä tuottavien kemiallisten reaktioiden reagenssit. Tuntevan lämmön varastoinnissa on kuitenkin huonojakin puolia. Esimerkiksi varastointitiheys on huomattavasti huonompi kuin muilla lämpövarastoilla, kuten kuva 3.4 osoittaa. Täten kemiallisella ja latenttisella lämpöenergian varastoinnilla on enemmän potentiaalia aurinkoenergiassa.



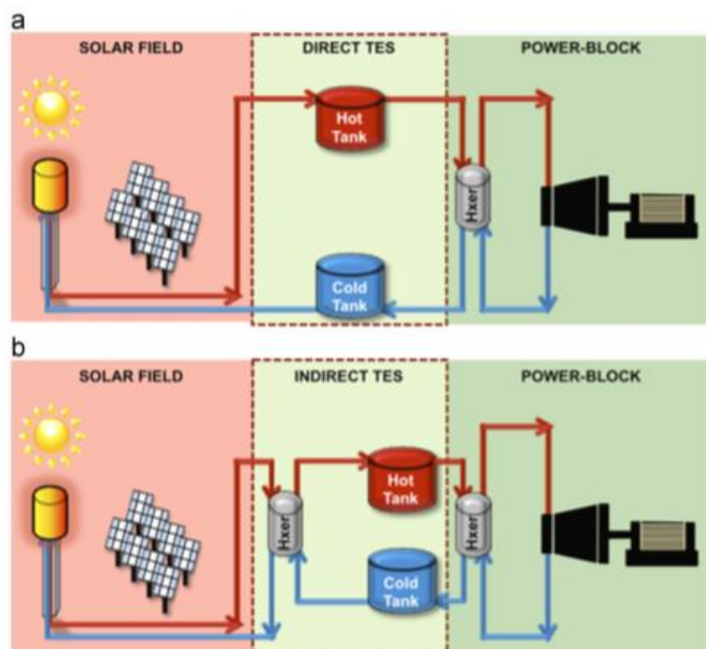
Kuva 3.4 6,7 MJ varastointiin vaadittavat tilavuudet varastointityypeittäin. [14]

Energiaa auringon säteilystä, eli aurinkoenergiaa, voidaan kerätä erilaisilla aurinkokeräimillä. Yleisesti aurinkokeräimet voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan: keskittäviin ja

ei-keskittäviin aurinkokeräimiin. Ei-keskittäviin aurinkokeräimiin lukeutuu perinteinen tasokeräin sekä sähköä ja lämpöä tuottava hybridi valosähköinen aurinkokeräin. Keskittäviin aurinkokeräimiin puolestaan lukeutuu muun muassa auringon mukana kääntyvä heliostaattinen keräin, aurinkotornit sekä paraboloidikourut ja -keräimet. [15]

Keskittäviä keräimiä hyödynnetään monesti keskittävän aurinkovoiman tuotannossa (concentrating solar power, CSP). CSP-voimalat koostuvat normaalisti lukuisista peileistä sekä muista heijastavista pinnoista keskittävien aurinkokeräimien lisäksi. Heijastavilla pinnoilla pyritään suuntaamaan säteilyä oikeaan kohtaan laitoksessa, jotta auringon säteilystä saataisiin mahdollisimman suuri määrä energiaa talteen. Koska säteilystä saatavaa energiaa ei saada yöllä samaa määrää kuin päivällä, kohta jo yli puolet CSP-voimaloista omaavat lämpöenergian varastointijärjestelmän [16]. Yleisin CSP-voimala hyödynittää paraboloidikouruja, sillä yli 95 % CSP-voimaloista käyttää kyseistä tekniikkaa [17].

Jokaista kolmea lämpöenergian varastointityyppiä voidaan hyödyntää CSP-voimaloissa [16]. Lämpövaraston peruseräite on esitetty visuaalisesti kuvassa 3.5. Kuvasta huomataan, että tyypillinen CSP-voimala koostuu aurinkokentästä, jossa kerätään keskitetty auringon lämpöenergia varastointiaineeseen. Tämän jälkeen lämpö siirtyy varastosta lämmönsiirtoaineeseen, joka siirtää energiaa energiantuotantopiiriin, esimerkiksi höyrypiiriin. Lämpövaraston täytyykin omata tiettyjä ominaisuuksia, jotta varastointi olisi järkevää. Hyvän lämpöenergiavaraston ominaisuuksien lisäksi varaston on integroiduttava CSP-laitokseen helposti sekä kestävä laitoksen maksimaalinen kuorma. Näiden ominaisuuksien lisäksi lämmönsiirto- ja varastointimateriaalin on toimittava keskenään moitteettomasti ilman energiahäviöitä. CSP-laitoksen energiavarasto onkin suunniteltava laitoksen toimintastrategian mukaisesti. [15]



Kuva 3.5 CSP-voimalan (a) välitön ja (b) välillinen lämpövarastojärjestelmä. [16]

Suurimmat CSP-laitokset löytyvät Espanjasta ja Yhdysvalloista. Kapasiteettia ollaan maailmanlaajuisesti kasvattamassa suuresti kehittyneempien keräin- ja varastointitekniikoiden myötä. CSP-laitoksien lämpöenergiavarastoissa keskitytään tulevaisuudessa muun muassa parantamaan faasimuutosmateriaalien energian siirtotehokkuutta. Puolestaan tuntevan lämmön varastoinnissa pyritään löytämään sopivampia lämmönsiirtoaineita. Myös varastointiaineiden korrosoivaa vaikutusta pyritään vähentämään materiaalien kulujen myötä. [16]

Aurinkoenergiaa kerätään myös rakennuksien pinnoilta pääasiassa tasokeräimien avulla. Monissa suomalaisissa kodeissa ja kesämökeissä on aloitettu käyttämään aurinkosähköä ja varastoimaan sitä akkuihin. Aurinkoenergiaa käyttäviä latenttisia lämpöenergiavarastoja on myös aloitettu tutkimaan ja hyödyntämään rakennusten lämmittämisessä, jäähdyttämisessä sekä lämmön tasaamisessa [4], [6]. Tältäkin aurinkoenergian lämpövarastoinnin osa-alueelta löytyy paljon kasvupotentiaalia.

Kasvava aurinkoenergian määrä pakottaa sähkö- ja lämpöenergian varastointitekniikoita kehittymään ja yleistymään niin kotitalouksissa kuin suuremmassakin mittakaavassa. Tällä hetkellä suurimmat kasvumahdollisuudet ovat termokemiallisilla sekä latenttisilla lämpöenergiavarastoilla, sillä näiden tehokkaiden järjestelmien energian varastointikyvyn potentiaalia ei ole vielä saatu lanseerattua globaalisti suurempaan mittakaavaan. Tutkimusta kuitenkin löytyy laajalti.

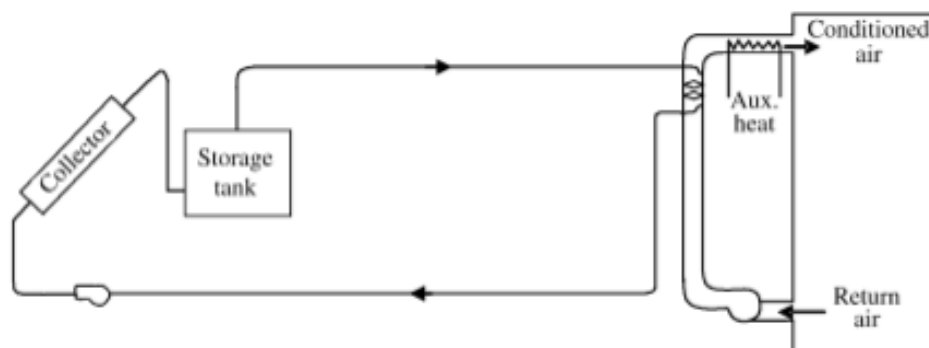
4. FAASIMUUTOSMATERIAALIT ENERGIAVARASTOINA

Faasimuutosmateriaalien suurin potentiaali tulevaisuudessa on lämpöenergian varastoinnissa erilaisissa teknisissä sovelluskohteissa. Näistä eniten tutkitut suuren mittakaavan kohteet ovat CSP-laitokset sekä rakennukset [4], [6], [16]. Edeltävissä käyttökohteissa faasimuutosmateriaaleilla toteutetut latenttiset lämpöenergiavarastot ottaisivat energiansa auringosta. Faasimuutosmateriaalien monipuolisuus sekä vaihtelevat sulamispisteet mahdollistavat niiden hyödyntämisen myös muun muassa lämpöherkkien materiaalien kuljetuksessa, elektroniikassa sekä tekstiileissä [2].

Vaikka faasimuutosmateriaaleilla on paljon potentiaalia, löytyy niiden ominaisuuksista myös parannettavaa. Toimivan energiavarastojärjestelmän luomiseen vaaditaan paljon energia- ja materiaalitekniikan sekä fysiikan tutkimusta ja tietämystä. Esimerkiksi on tiedostettava eri aineiden spesifit sulamispisteet, potentiaaliset käyttökohteet, kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet.

4.1 Tekninen toteutus

Faasimuutosmateriaaleilla toteutettu latenttinen lämpöenergiavarasto koostuu varastosäiliöstä, energiakeräimestä, erilaisista lämmönsiirtopinnoista sekä lämmönsiirtoaineen putkista. Kuvan 4.1 yksinkertainen järjestelmä ottaa lämpöenergian auringosta sekä hyödyntää energian varastoinnissa faasimuutosmateriaalisäiliötä. Tämän lisäksi kuvan 4.1 järjestelmässä on ilmakehässä ulkoinen lämmitin takaamaan sopivan lämpötilan mikäli faasimuutosmateriaalista saatava lämpöenergia ei riitä. [2] Kuvan 4.1 kaltaiset järjestelmät ovat yleisiä, sillä aurinkoenergiaa hyödynnetään monissa latenttisissa energiavarastoissa, etenkin rakennuksiin integroiduissa järjestelmissä.



Kuva 4.1 Yksinkertaistettu malli aurinkolämmitteisestä varastointijärjestelmästä. [1]

Yksi PCM-järjestelmän huonoista puolista on faasimuutosmateriaalien huono lämmönjohtokyky. Faasimuutosmateriaalien huono lämmönjohtokyky heikentää varastointijärjestelmän tehokkuutta ja varastointikykyä sekä hidastaa lämmönsiirtoa systeemissä. Alan kirjallisuudessa [1], [3], [5], [6], [8], [13], [15], [18] on perehdytty paljon faasimuutosmateriaalien lämmönjohtokyvyn kasvattamismetodeihin. Erityisesti faasimuutosmateriaalien kapseloinnista löytyy paljon tutkimusta. [3]

4.1.1 Kapselointi

Kapseloinnilla tarkoitetaan faasimuutosmateriaalin peittämistä tai vuoraamista toisella aineella. Kapselointi suurentaa lämmönsiirtopinta-alaa sekä rajoittaa faasimuutosmateriaalin tilavuuden muutosta faasimuutoksessa ja reagoimista ulkopuolisen ympäristön kanssa. Ennen kaikkea kapselointi parantaa materiaalin lämmönjohtokykyä ja estää faasimuutosmateriaalin sekoittumista järjestelmän lämmönsiirtoaineeseen [18]. Muun muassa näiden syiden vuoksi kapselointi on ollut jo yli 20 vuoden ajan ollut laajalti kaupallisessa käytössä sekä ilmennyt faasimuutosmateriaalien tutkimuksissa. [13]

Kapselointi voidaan jakaa koon puolesta kolmeen eri kategoriaan: makrokapselointi (yli 1 mm), mikrokapselointi (1 – 1000 μm) ja nanokapselointi (0 – 1000 nm). Makrokapselointi on näistä yleisin tapa, sillä pienemmän kapselin tekeminen on monimutkaisempaa. Pienemmillä kapseleilla on kuitenkin suurempi lämmönsiirtopinta-ala, jonka vuoksi mikrokapseleita valmistetaan myös. Mikrokapseloidulla faasimuutosmateriaalilla on lisäksi paremmat mahdollisuudet tilavuuden muutoksiin faasimuutoksessa kuin makrokapseloidulla. Aurinkoenergian varastoinnissa käytetään eniten mikrokapseloituja faasimuutosmateriaaleja [13]. Makrokapseloinnin huonona puolena on myös sen suuri koko, joka aiheuttaa lämpötilaeron kapselin keskiosan ja reunojen välillä. Nanokapseleita ei ole vielä käytetty laboratorion ulkopuolella, mutta niiden stabiiliutensa vuoksi nanokapseloinnilla on potentiaalia lämpövarastojärjestelmissä. Yleisimmät kapselit ovat muodoltaan pallomaisia, putkimaisia, sylinterimäisiä tai levyjäisiä. [18]

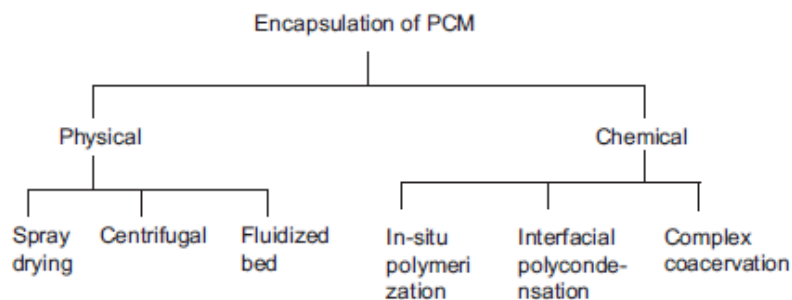
Kuorimateriaalin valinnalla on suuri merkitys systeemin lämmönsiirrollisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Yleisesti ottaen ideaalisen kuorimateriaalin ominaisuudet ovat:

- Kuoren tulisi kestää faasimuutosmateriaalin faasimuutos rakenteellisesti sekä termisesti.
- Kuorimateriaalin tulisi säilyttää termofyysiset ominaisuutensa myös mikro- ja nanokoossa.
- Kuori ei saisi vuotaa lämpöenergiaa tai ainetta ulkopuolelle
- Kuorimateriaali ei saisi reagoida sisältönsä eli faasimuutosmateriaalin kanssa.
- Kuorella tulisi olla hyvä vesidiffuusiovalti.

- Kuorimateriaalilla tulisi lisäksi olla suurempi lämmönjohtokyky kuin faasimuutosmateriaalilla, jotta itse faasimuutosmateriaalin ja ympäristön lämmönsiirto voitaisiin minimoida. [18]

Käytetyimmät kuorimateriaalit ovat polypropeeni, polyolefiini, polyamidi, piioksidi, polyurea, ureaformaldehydi, kupari sekä alumiini [15]. Yleisesti siis käytetään erilaisia polymeereja sekä metalleja kuorimateriaalina. Etenkin lämpövarastoissa käytetyissä mikrokapseleissa käytetään luonnollisia ja synteettisiä polymeereja [2].

Kun halutaan korkea lämmönjohto faasimuutosmateriaalin, kapselin kuoren ja lämmönsiirtoaineen välille, metalliset kuorimateriaalit ovat hyviä valintoja, esimerkiksi alumiini ja kupari. Metallisia materiaalit soveltuvat myös hyvin korkean lämpötilan järjestelmiin, mutta kyseisiä materiaaleja on erittäin vaikea käyttää mikrokapseloinnissa. Orgaanisille faasimuutosmateriaaleille epäorgaaniset kuorimateriaalit soveltuvat hyvin muun muassa täydellisen lämmönjohtavuuden sekä korkean mekaanisen lujuuden vuoksi. Lisäksi epäorgaaninen pinnoite tekee helposti syttyvistä orgaanisista aineista turvallisempia käyttää. Esimerkiksi pii on erittäin hyvä kuorimateriaali. Orgaanisia faasimuutosmateriaaleja mikrokapseloidaan paljon, sillä esimerkiksi suolahydraateilla ilmenevää korrosoivaa vaikutusta ei esiinny orgaanisilla aineilla. [18]



Kuva 4.2 Faasimuutosmateriaalien mikrokapselointitekniikoita. [18]

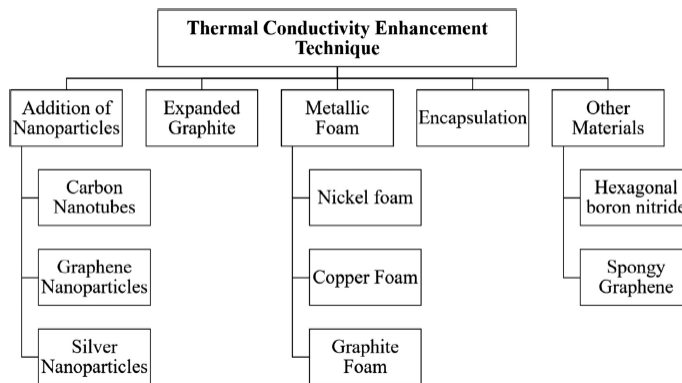
Mikrokapselointitekniikat voidaan jakaa karkeasti kahteen eri kategoriaan fysikaalisten ja kemikaalisten muodostustekniikoiden mukaan kuvan 4.2 osoittamalla tavalla. Fysikaaliseen mikrokapselointiin kuuluvat sumukuivatus, fluidikromatografia ja keskipaikoisekstruusio. Kemiallisiksi menetelmiksi luokitellaan in-situ polymerointi, kompleksinen koaservaatio sekä rajapintapolykondensaatio. Fysikaaliset menetelmät tuottavat suurempia ja karkeapintaisempia mikrokapseleita verrattuna kemiallisiin menetelmiin. In-situ polymerointia on tutkimusten puolesta pidetty hyvänä mikrokapselointimenetelmänä, koska sen avulla saadaan hyvälaatuinen kuori sekä tarpeeksi pieniä kapseleita. [1], [18]

Kapselointiin liittyviä ongelmia löytyy ja yksi suurin niistä on mikrokapseloinnin korkea hinta. Korkea hinta on muun muassa estänyt suuremman mittakaavan kaupallistumisen

mikrokapseloituille faasimuutosmateriaaleille. Kapselointi voi myös vaikuttaa faasimuutosmateriaalin termisiin ominaisuuksiin, mikä pienentää lämpövarastojärjestelmän elinikää eli vähentää lataus syklien lukumäärää ajan saatossa. Tähän kuitenkin voidaan varautua muilla lämmönsiirtojärjestelmää tukevilla toimenpiteillä. [18]

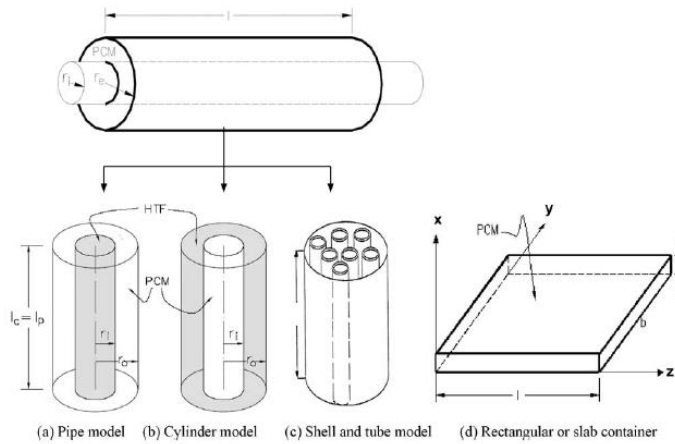
4.1.2 Muut lämmönsiirtoa ja -johtokykyä parantavat menetelmät

Kapselointi ei ole ainoa faasimuutosmateriaaleilla toteutettavan latenttisen lämpövarastojärjestelmän termisiä ominaisuuksia parantava tekniikka. Kyseisiä tekniikoita on monia, mutta yksi paljon käytetty tapa parantaa materiaalin lämmönjohtokykyä on sekoittaa faasimuutosmateriaalin joukkoon metallisia tai hiiliperäisiä nanopartikkeleita. Tämän menetelmän lisäksi metallisia vaahtoja, laajennettuja grafiitteja sekä muita paremman lämmönjohtokyvyn omaavia aineita sekoitetaan faasimuutosmateriaalien joukkoon parantamaan lämmönjohtokykyä. Kuvassa 4.3 on esitelty lämmönjohtokyvyn tehostamis- menetelmiä.



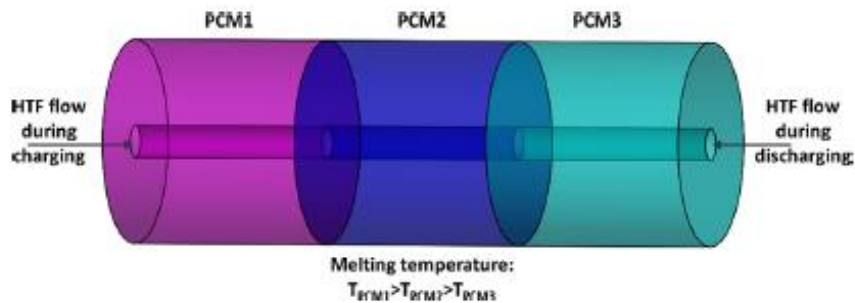
Kuva 4.3 Faasimuutosmateriaalien lämmönjohtokyvyn parannusmenetelmiä. [3]

Lämmönjohtokyvyn parantamisella voidaan vaikuttaa paljon lämpövarastojärjestelmän toimivuuteen sekä tehokkuuteen. Kapselointi sekä muiden aineiden sekoittaminen PCM-säiliöön eivät ole ainoat tekniikat joilla parantaa järjestelmän lämmönsiirtoa. Esimerkiksi säiliön geometrialla sekä mitoilla voidaan vaikuttaa lämmönsiirtoon suuresti [19]. Säiliö tulee suunnitella tarkasti sijoituskohteen mukaisesti. Kuvassa 4.4 on esitelty käytetyimpiä PCM-säiliöitä.



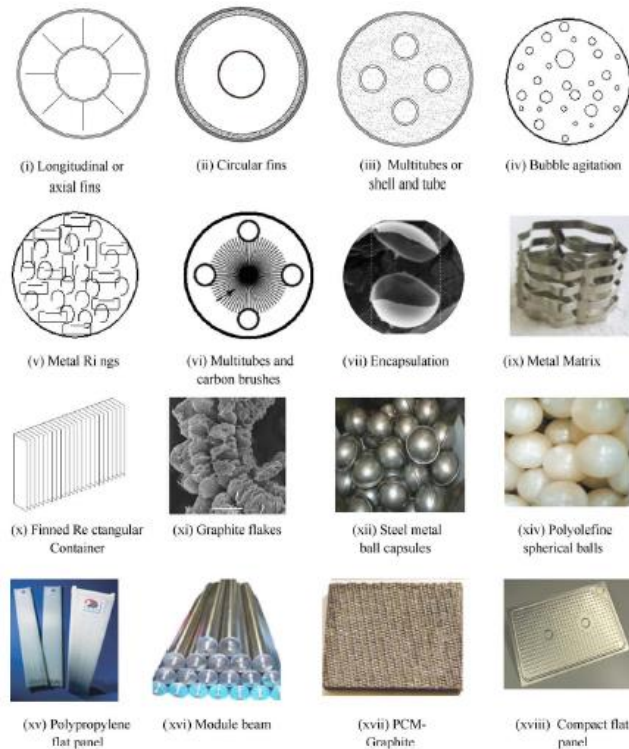
Kuva 4.4 Käytetyimmät PCM-säiliömallit: (a) putki, (b) sylinteri, (c) kuori ja (d) laatta. [19]

Erilaisia lämmönsiirron parannustekniikoita ovat muun muassa ripojen hyödyntäminen putki- ja säiliörakenteissa. Tämän lisäksi on myös testattu metallimatriisien ja -renkaiden upottamista PCM-säiliöön ja -putkistoon kupla-agitaation lisäksi. Näistä kupla-agitaatio ei sen muodostamasta pakotetusta konvektiosta huolimatta parantanut lämmönsiirtoa. Puolestaan metallimatriisien ja -renkaiden käyttö ei tuottanut niin loisteliaita tuloksia kuin perinteisempi rivoitettu putkirakenne. Suositeltavaa on kuitenkin hyödyntää ripoja tai metallirenkaita lämmönsiirron parantamiseksi faasimuutosmateriaaleja hyödynnettäessä. [2]



Kuva 4.5 Putkimainen kaskadijärjestelmä. [16]

Yksi käytetty lämmönsiirron parannustekniikka on kaskadikytkentä, jossa hyödynnetään eri sulamispisteen omaavia faasimuutosmateriaaleja. Kuva 4.5 osoittaa kuinka PCM-kaskadijärjestelmä on käytännössä toteutettu. Kaskadijärjestelmän avulla voidaan lämmönsiirtosuhde pitää vakaampana kuin yhdellä faasimuutosmateriaalilla toteutetussa järjestelmässä [16].



Kuva 4.6 Yleisimmät faasimuutosmateriaalien lämmönsiirron tehostustekniikat. [2]

Kuva 4.6 kuvastaa yleisimpiä ja tutkituimpia lämmönsiirron tehostustekniikoita faasimuutosmateriaaleilla. Näistä luotettavimmat tulokset ovat antaneet faasimuutosmateriaalien mikrokapselointi, ripojen hyödyntäminen sekä erilaisten lämmönsiirtopintojen integroiminen osaksi putkisto- ja säiliörakenteita. Näiden kaikkien tehokkaiden menetelmien yhdisteleminen lämpövarastojärjestelmässä tuottaa varmasti parhaimpia tuloksia.

4.2 Aurinkoenergian varastointijärjestelmä

Aurinkoenergiaa voidaan varastoida faasimuutosmateriaaleilla toteutettuihin latenttisiin lämpövarastoihin sekä passiivisesti että aktiivisesti. Passiivisessa varastoinnissa lämmönvarastointijärjestelmässä ei ole tarvetta erillisille lämmönkuljettimille [2], joten faasimuutosmateriaali varastoi lämpöenergiaa suoraan itseensä esimerkiksi auringosta. Hyvä esimerkki passiivisesta järjestelmästä on faasimuutosmateriaalien käyttö rakennusten seinissä tai lattioissa. Aktiivinen PCM-aurinkoenergiavarasto puolestaan pyrkii luovuttamaan lämpöenergiaa kun sitä tarvitaan, eli esimerkiksi talvella tai yöllä. Aktiivisia järjestelmiä käytetään muun muassa rakennuksissa korkean kulutuksen aikana [13] sekä CSP-voimaloissa tuotannon tasaamisessa.

Käytetyimmät faasimuutosmateriaaleilla toteutetut aurinkoenergian varastointijärjestelmät löytyvät integroituna rakennuksista sekä CSP-voimaloista. Rakennuksissa hyödynnettävissä järjestelmissä käytetään yleisesti matalan ja keskitason lämpötilan faasimuu-

tosmateriaaleja, kuten orgaanisia materiaaleja [8]. Puolestaan korkeamman sulamispisteen omaavia faasimuutosmateriaaleja, kuten suolahydraatteja [16] ja metallisia aineita hyödynnetään CSP-voimaloiden lämpövarastoissa [17].

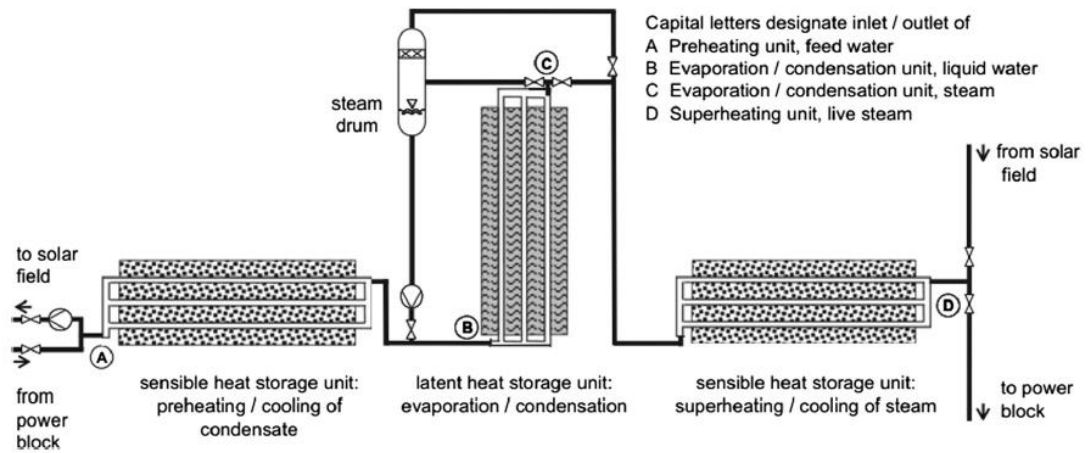
4.2.1 Järjestelmä CSP-voimaloissa

Yleisin lämpöenergian varastoinnin muoto CSP-laitoksissa on tuntuvan lämmön varastointi. Varastointiaineena käytetään paljon erilaisia suolayhdisteitä ja sulasuolaa. Myös vettä on käytetty lämmönsiirtofluidina. Toistaiseksi yhtäkään latenttista lämpöenergiavarastoa ei ole kaupallisissa CSP-laitoksissa käytössä. Tähän suurimpana syynä on se, että korkeammissa lämpötiloissa toimivien faasimuutosmateriaalien kapselointi sekä järjestelmän lämmönsiirron parantaminen ovat vielä tutkimusvaiheessa niiden haastavuutensa vuoksi. CSP-voimaloissa lämmönsiirtofluidin toimintalämpötila on normaalisti luokkaa 393-565 °C, jolloin varastointiaineen toimintalämpötila on noin 292-385 °C paraboloidikouruille ja 290-565 °C aurinkotorneille [16]. Toivottavaa olisi kuitenkin, että faasimuutosmateriaalien toimintalämpötilat olisivat näitä korkeampia. [17]

Faasimuutosmateriaalien hyödyntämisen potentiaali CSP-laitoksissa on kuitenkin huomioitu ja erilaista ratkaisuja on tutkittu käytännön toteutuksia varten. Pääongelmana on siis lämmönsiirtofluidin ja faasimuutosmateriaalin välinen lämpöresistanssi [16], joka tekee järjestelmästä kehnosti toimivan. Tähän ongelmaan kapselointi ja paremman lämmönjohdotkyvyn omaavien aineiden lisääminen auttaa. Korkean lämpötilan faasimuutosmateriaalien kapselointi on hyvin haastavaa, mutta lähitulevaisuudessa oletetaan tekniikan kehittyvän [17].

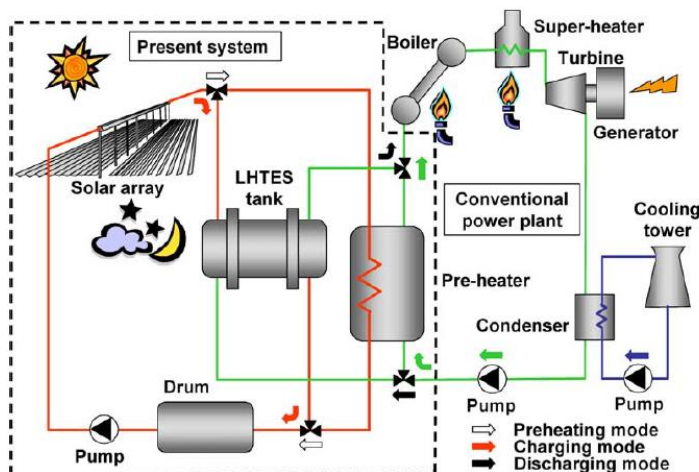
Natriumnitraattia (NaNO_3) on tutkittu paljon viimeisen 10 vuoden aikana CSP-voimaloiden lämmönvarastointiaineena, jopa onnistuneesti. Saksalainen DLR on tutkimusten takana. Yksi DLR:n prototyypeistä on koostunut seitsemästä teräsputkesta, joiden sisällä lämmönsiirtoaine eli höyry liikkuu, sekä alumiinirivoista. Kyseessä on siis kuorimainen säiliörakenne, joka sisälsi 140 kg NaNO_3 :a. Tämä järjestelmä pystyi onnistuneesti kestämään onnistuneesti 172 sykliä lämpötilojen ollessa 296-316 °C. [17]

Toinen NaNO_3 :n kokeilu varastointiaineena toteutettiin Espanjassa luonnollisissa olosuhteissa. Tässä projektissa natriumnitraattia oli lämpövarastossa peräti 14 tonnia. Lämmönvarastointijärjestelmänä toimi kuvan 4.7 osoittama kolmiosainen lämpövarasto, joka koostui yhdestä latenttisesta ja kahdesta tuntuvan lämmön varastosta. Järjestelmässä lämmönsiirtoaineena toimii vesi, jota ensimmäinen tuntuvan lämmön varasto esilämmittää tai jäähdyttää. Tämän jälkeen kaksiosainen latenttinen varasto höyrystää tai kondensoi lämmönsiirtoaineen, jonka lopuksi viimeinen tuntuvan lämmön varasto tulistaa tai jäähdyttää. Kyseinen järjestelmä kesti 172 sykliä (yli 4000 h) onnistuneesti ilman faasimuutosmateriaalin ominaisuuksien alentumista lämpötilan vaihdellessa välillä 25-400 °C. [17]



Kuva 4.7 Kolmiosainen lämpöenergian varastointijärjestelmä. [17]

Näiden kahden koejärjestelyn lisäksi on kokeiltu palautuslämpövarastoa (reflux heat transfer storage, RHTS), jossa hyödynnettiin natriumkloridia faasimuutosaineena sekä lämmönsiirtoaineena sinkki-tina -seosta sekä difenyylin ja -oksidin eutektista seosta yhdessä. Kyseiselle järjestelmälle on ennustettu lupaavia tuloksia sen suuresta hinnasta huolimatta. Näiden järjestelmien lisäksi erilaisten faasimuutosmateriaalien yhdistämistä samaan järjestelmään on pidetty lupaavana metodina tuleviin CSP-hankkeisiin. Eri sulamispisteiden omaavia faasimuutosmateriaaleja hyödyntävä kaskadijärjestelmä on myös yksi potentiaalinen ratkaisu CSP-voimaloiden lämpöenergian varastointiin. Myös monen erillisen faasimuutosmateriaalisäiliön integroimista osaksi lämmönvarastointijärjestelmää on kokeellisesti testattu toistaiseksi kuitenkin ilman haluttuja tuloksia. Tällaisella järjestelmällä on kuitenkin potentiaalia takaamaan tasaisempi lämmönsiirtoaineen ulostulolämpötila sekä korkeampi eksergian tehokkuus. [17]



Kuva 4.8 Aurinkoenergiaa hyödyntävä latenttinen lämpövarasto osana perinteistä voimalaitosyksikköä. [20]

Australiassa on tutkittu kuvan 4.8 kaltaista järjestelmää, jossa 240 MW fresnel-linssejä hyödyntävään voimalaan on integroitu faasimuutosmateriaaleilla toteutettu latenttinen lämpövarasto. Aurinkoenergiajärjestelmä olisi myös kuvan näyttämällä tavalla osa perinteistä voimalaitosprosessia. Kyseisen järjestelmän latenttinen lämpövarasto voitaisiin toteuttaa edullisella NaNO_2 . Järjestelmän odotetaan tuottavan edullisesti matalapaineista höyryä turbiineille. [20]

Taulukko 4.1 SHTES- ja LHTES -järjestelmien LCOE -hintojen rakenteet. [17]

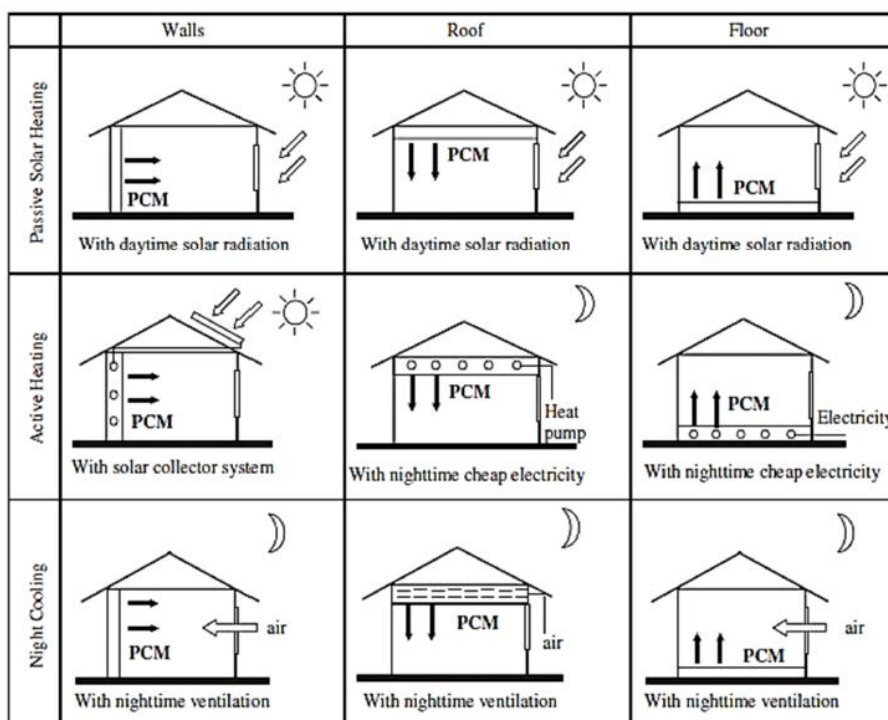
Levelized cost of electricity for a 60 MWe CSP plant for SHTES and LHTES.

Cost contributor	Thermocline storage system (60 MWe, 35% thermal efficiency)			
	SHTES with granite rocks under 6 h charge	LHTES with KOH under 8 h charge	LHTES with KOH under 6 h charge	LHTES with 58% NaCl–42% KCl under 6 h charge
Periods (years)	25	25	25	25
Discount rate (%)	3	3	3	3
Capital cost (\$/kW)	\$517.30	\$368.50	\$385.90	\$355.30
Fixed O&M cost (\$/kWe-yr)	\$40	\$40	\$40	\$40
Variable O&M cost (\$/kW h)	0.002	0.002	0.002	0.002
Capacity factor (%)	43.6	43.6	43.6	43.6
Electricity price (cents/kW h)	12	12	12	12
Cost escalation rate (%)	2.3	2.3	2.3	2.3
Levelized cost of electricity (¢/kW h)	10.0	9.8	9.8	9.8

Mahdollisia vaihtoehtoja CSP-voimaloiden latenttisille lämpöenergian varastointijärjestelmille löytyy sekä kasvavassa määrin myös tutkimustakin. Järjestelmien kehityksen haastavuus ja kompleksisuus ovat viivästyttäneet CSP-voimaloiden faasimuutosmateriaalivarastojen suurempaa kaupallistamista. Vaikka faasimuutosmateriaalit ovat itsessään hyvin hintavia verrattuna tuntuvan lämmön varastointiaineisiin, on LHTES-järjestelmällä tuotettu energia halvempaa kuin SHTES-järjestelmällä, kuten taulukosta 4.1 näkee. Eli latenttisen lämpövarastojärjestelmän LCOE -hintaa (Levelized cost of energy) on alhaisempi kuin tuntuvan lämpövarastojärjestelmän. [17] Tätä voidaan pitää yhtenä erittäin lupaavana tekijänä CSP-voimaloiden energia- ja kustannustehokkaammalle tulevaisuudelle.

4.2.2 Järjestelmän integrointi rakennuksiin

Toistaiseksi faasimuutosmateriaaleilla toteutettuja aurinkoenergiaa hyödyntäviä latenttisia lämpövarastoja on eniten integroituna rakennuksissa. Näiden suurimpana tarkoituksena on huoneilman jäähdyttäminen ja lämmittäminen [1]. Kuvan 4.9 osoittamalla tavalla järjestelmän integrointi onnistuu passiivisesti varastoimalla energia rakenteisiin tai aktiivisesti aurinkokeräinten tai halvemman yösähköön avulla. Yksi vaihtoehto on myös lämpöenergian kerääminen faasimuutosmateriaaliin päivän aikana, jolloin huoneilmaa jäähdytetään. Tällöin faasimuutosmateriaalijärjestelmä purkaa lämmön yön aikana luonnollisen ilmanvaihdon tai erillisen tuulettimen kautta. [6] Kaikkien edeltävien järjestelmien tarkoituksena on ekologisesti ja ympäristöystävällisesti pitää rakennuksen huoneilma taseisena.

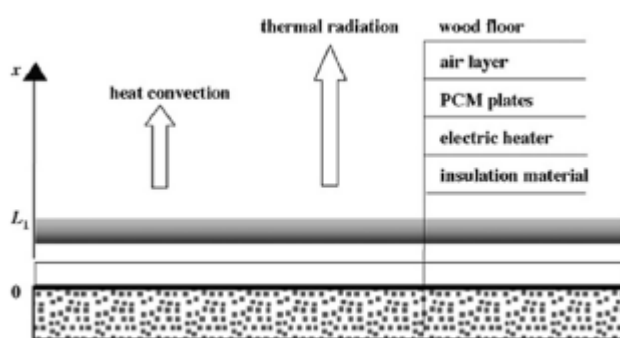


Kuva 4.9 Faasimuutosmateriaalien hyödyntämistekniikat rakennuksissa. [6]

Potentiaalisin ja tutkituin kohde faasimuutosmateriaalien rakennuksiin integroinnissa on sisäilman jäähdyttämisen toteuttaminen. Jäähdyttäminen voidaan toteuttaa viidellä eri tutkitulla tavalla: vapaa jäähdytys, aurinkojäähdytys, ilmastointijärjestelmät, haihdutus- ja säteilevä jäähdytys sekä faasimuutosmateriaali rakennusaineissa. Vapaan jäähdytyksen järjestelmissä huoneilmaa kierrätetään erillisen PCM-lämpövaraston kautta. Kyseisiä järjestelmiä ei kuitenkaan ole kaupallistettu, sillä normaali ilmastointilaitteisto on 10% halvempi. Aurinkojäähdytysjärjestelmät ovat samankaltaisia kuin vapaan jäähdytyksen järjestelmät, mutta tarvittava energia absorboidaan auringon säteilystä. PCM-ilmastointijärjestelmät puolestaan pyrkivät käyttämään faasimuutosmateriaaleja osana perinteistä ilmastointijärjestelmää vähentämällä sen kuormaa. Haihdutukseen perustuvassa jäähdytyksessä huoneilman lämpöenergiaa sidotaan veden höyrystymisreaktioon. Viimeisin vaihtoehto jäähdytykselle eli haihdutusjäähdytys perustuu yön aikana tapahtuvaan poistuvaan lämpösäteilyyn. Suurin osa edellä mainituista tekniikoista ja järjestelmistä on ollut toimivia vasta prototyyppi- ja teoriasolla, mutta toivottuja tuloksia on saatu muun muassa Etelä-Euroopassa sekä Kiinassa ja Japanissa. Kuitenkaan kuivissa aavikko-olosuhteissa järjestelmiä ei ole vielä testattu, missä jäähdytysjärjestelmillä olisi vielä paljon käyttöä. [4]

Faasimuutosmateriaaleja voidaan integroida rakennusaineisiin kuten seiniin, lattiaan ja jopa ikkunoihin [6]. Muun muassa betoniin ja kipsilevyyn on onnistuttu lisäämään kapseloituja faasimuutosmateriaaleja pitämään sisälämpötila tasaisena. Ikkunoihin lisätyt faasimuutosmateriaalit pyrkivät vähentämään sisälle pääsevää lämpösäteilyä. Tois-

taiseksi ikkunoihin integroiduista järjestelmistä on hyvin vähän tietoa. Rakenteisiin integroidussa järjestelmässä lämmönsiirto voidaan myös toteuttaa passiivisesti tai aktiivisesti fluidin tai pakotetun ilmavirtauksen avulla. Myös kuvan 4.10 sähkölämmitteinen lattiaan integroitu PCM-järjestelmä on hyvä esimerkki aktiivisesta järjestelmästä, joka hyödyntää halvempaa yösähköä. [6] Erilaiset koejärjestelmät ovat tuottaneet hyviä tuloksia [1], joten faasimuutosrakenteilla näyttäisi olevan tulevaisuutta, kalliista hinnastaan huolimatta. Kun faasimuutosmateriaalia lisätään rakenteisiin, täytyy kuitenkin ottaa huomioon paloturvallisuus sekä rakennemateriaalin omat ominaisuudet, jotta ne eivät heikene materiaalisäyksestä huolimatta.

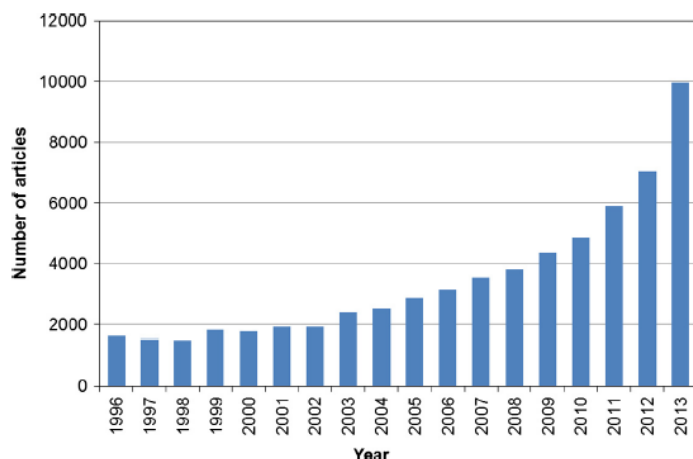


Kuva 4.10 Sähköä käyttävä aktiivinen PCM-lämmitysjärjestelmä. [2]

Rakennuksissa hyödynnettävien faasimuutosmateriaalien sulamispisteiden tulisi olla hyvin alhaisia verrattuna CSP-voimaloiden materiaaleihin. Faasimuutosmateriaalin sulamispisteen tulisi olla 18–28 °C, jotta rakennusten lämpötilat olisivat ihmiselle sopivia. Oikean faasimuutosmateriaalin valintaan vaikuttavat myös ulkoilman sääolosuhteet ja lämpötilat, faasimuutosmateriaalin muut ominaisuudet, rakennuksen ominaisuudet sekä halutun latenttisen lämpövarastojärjestelmän ominaisuudet ja kustannukset. Sulamispisteensä puolesta erilaiset suolahydraatit, rasvahapot, parafiinit ja -vahat soveltuvat hyvin rakennuksiin. Parafiineilla ja parafiinivahoilla on huonompi lämmönjohtokyky kuin epäorgaanisilla suolahydraateilla, mutta halvan hintansa, korkean sulamislämpönsä ja saatavuutensa vuoksi kyseisiä yhdisteitä käytetään rakennuksissa paljon. Puolestaan suolahydraattien huonona puolena ovat niiden korkea reaktiivisuus ulkopuolisten aineiden kanssa, sakkaantuminen ajan kanssa sekä korrosoiva vaikutus. Suolahydraatit omaavat kuitenkin erittäin korkean lämmönjohtokyvyn sekä sulamislämmön muihin faasimuutosmateriaaleihin verrattuna. [4], [21]

4.3 Tulevaisuuden haasteet ja mahdollisuudet

Faasimuutosmateriaaleilla toteutettujen latenttisten energiavarastojen tulevaisuus näyttää yleisesti katsottuna valoisalta. Tutkimuksien ja tieteellisten artikkeleiden määrä on huomattavasti suurempi tällä hetkellä kuin 2000-luvun alussa, kuten kuva 4.11 osoittaa. Tutkimuksen määrän kasvaminen on erittäin positiivinen asia tulevaisuutta ajatellen.



Kuva 4.11 Julkaistujen artikkeleiden, jotka käsittelevät faasimuutosmateriaaleja lämpö-energiavarastoina, vuotuinen määrä. [13]

Teknisen toteutuksen kompleksisuus on tällä hetkellä yksi suurimmista haittapuolista etenkin korkean sulamispisteen omaavien faasimuutosmateriaalien kanssa. Muun muassa kapselointi, mobiiliratkaisut sekä lämmönsiirtopinnat ja -putket tarvitsevat tällä hetkellä kehitystä ja tutkimusta. Korkeissa lämpötiloissa tapahtuu myös CSP-voimaloissa materiaalien korroosiota, johon on myös keksittävä kestäviä ratkaisuja. [16] Korkean lämpötilan faasimuutosmateriaaleille on vähemmän toteutettuja ratkaisuja niiden fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien vuoksi, mutta tämä osa-alue faasimuutosmateriaaleista kaipaa paljon tutkimusta, jotta faasimuutosmateriaalien potentiaalia voitaisiin hyödyntää suuremman mittaluokan CSP-voimaloissa.

Vuonna 2011 Yhdysvaltojen energiaosasto julkaisi SunShot -hankkeen, jonka aggressiivisen tutkimustyön tavoitteena on saada CSP-teknologiat kilpailukykyisiksi energiantuotantomuodoiksi vuosikymmenen loppuun mennessä. Tavoitteena olisi siis saada LCOE - hinta alle 6 ¢/kWh ilman tukia. Kuten taulukosta 4.1 huomataan, tavoitteesta jäädyään vielä paljon, mutta tämä tulos osoittaa tutkimuksen ja kehityksen tärkeyttä aurinkoenergian varastoinnissa. [19] Tuotetun energian hinnan tippuminen kilpailukykyiseksi perinteisemmällä tavoilla tuotetulle energialle kasvattaisi varmasti aurinkoenergian tuotantoa suuresti.

Rakennuksissa yksi tulevaisuuden potentiaalisin tutkimuksen kohde on erilaisten faasimuutosmateriaalien hyödyntäminen samassa järjestelmässä [4]. Tällainen järjestelmä pystyisi takaamaan rakennuksen lämmityksen sekä jäähdytyksen erilaisissa sääolosuhteissa ympäri vuoden. Esimerkiksi Suomen vaihtelevissa sääolosuhteissa ei yhden faasimuutosmateriaalin lämpövarastojärjestelmällä olisi paljoa käyttöä.

Tulevaisuudessa faasimuutosmateriaalien ja latenttisten energiavarastojen tutkimus tulee keskittymään muun muassa biomateriaalien hyödyntämiseen sekä nanokapselointiin ja -materiaaleihin [13]. Myös yksi tulevaisuuden mahdollinen ratkaisu on useampien erilaisten tuotanto- ja varastointijärjestelmien hyödyntäminen, eli hybridiratkaisut [10].

5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tutkia monipuolisesti faasimuutosmateriaaleja, energiavarastoja sekä etenkin faasimuutosmateriaaleja aurinkoenergian varastoinnissa. Yleisten ominaisuuksien lisäksi työssä analysoitiin erilaisia tutkittuja faasimuutosmateriaaleilla toteutettuja aurinkoenergiaa hyödyntäviä latenttisia energiavarastojärjestelmiä.

Faasimuutosmateriaalit kykenevät faasimuutoksen yhteydessä varastoimaan tai sitomaan suuren määrän lämpöenergiaa. Tätä ominaisuutta pystytään hyödyntämään monissa sovelluksissa, kuten latenttisissa energiavarastoissa. Puolestaan latenttisia energiavarastoja voidaan käyttää aurinkoenergian varastointiin, vaikka akut ja tuntuvan lämmön varastointitekniikat ovatkin yleisempiä. Faasimuutosmateriaaleilla toteutetuissa latenttisissa energiavarastoissa on kuitenkin potentiaalia muun muassa niiden suuren energiatilheyden vuoksi. Latenttisissa lämpövarastojärjestelmissä on kuitenkin paljon ongelmakohtia, kuten materiaalien lämmönjohtokyvyn kasvattaminen, järjestelmän kompleksisuus sekä korroosio-ongelmat.

Työssä on faasimuutosmateriaalien ja energiavarastojen yleisten ominaisuuksien lisäksi tutkittu faasimuutosmateriaalien hyödyntämismahdollisuuksia ja sovelluksia aurinkoenergian varastoinnissa. Tarkemmin perehdytään järjestelmiin CSP-voimaloissa sekä rakennuksissa muutaman esimerkkiratkaisun avulla. Rakennuksien sisäilman jäähdyttämiseen ja lämmittämiseen faasimuutosmateriaaleja on onnistuneesti käytetty, mutta korkeamman lämpötilan sovelluksissa CSP-voimaloissa on suurempia ongelmia järjestelmän toteutettavuuden kanssa. Molemmissa sovelluskohteissa tutkimusta tehdään vuosi vuodelta suuremmissa määrissä, joten latenttisten energiavarastojen tulevaisuus vaikuttaa kirkkaalta, vaikka tähän päivään mennessä on käytännössä toteutettu vain prototyyppitason ratkaisuja. Uusiutuvien energialähteiden kasvavan käytön myötä on odotettavissa myös latenttisten lämpövarastojen suosion nousua.

Faasimuutosmateriaaleja voidaan käyttää onnistuneesti aurinkoenergian varastoinnissa erilaisissa tilanteissa, kuten tutkimustulokset osoittavat. Järjestelmien kaupallistaminen sekä käyttö ympäri maailmaa erilaisissa sääolosuhteissa vaatii kuitenkin paljon lisää tutkimusta sekä erilaisten materiaalien ja varastointi- ja tuotantojärjestelmien integroimista yhteen. Faasimuutosmateriaalien käyttö on yksi vastaus aurinkoenergian taloudellisempaan tuotantoon sekä varastointiin, mikäli varastointijärjestelmiä pystytään kehittämään onnistuneesti myös tulevan vuosikymmenen aikana. Onkin hyvin todennäköistä, että 2030-luvulla aurinkoenergian varastoinnissa käytetään globaalisti faasimuutosmateriaaleilla toteutettuja latenttisia lämpövarastoja sekä CSP-voimaloiden tuotannon tasaamisessa että rakennusten sisälämpötilan säätelyssä.

LÄHTEET

- [1] M. Kenisarin, K. Mahkamov, Solar energy storage using phase change materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, Iss. 9, 2007, pp. 1913-1965.
- [2] Pönkä A., Faasimuutosmateriaalien käyttö energian varastoinnissa, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2012
- [3] Z.A. Qureshi, H.M. Ali, S. Khushnood, Recent advances on thermal conductivity enhancement of phase change materials for energy storage system: A review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, 2018, pp. 838-856.
- [4] F. Souayfane, F. Fardoun, P. Biwale, Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review, *Energy and Buildings*, Vol. 129, 2016, pp. 396-431.
- [5] M.M. Farid, A.M. Khudhair, S.A.K. Razack, S. Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, Iss. 9, 2004, pp. 1597-1615.
- [6] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, H. Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, *Building and Environment*, Vol. 42, Iss. 6, 2007, pp. 2197-2209.
- [7] S. Raoux, D. Ielmini, M. Wuttig, I. Karpov, Phase change materials, *MRS Bulletin*, Vol. 37, Iss. 2, 2012, pp. 118-123.
- [8] J. Pereira da Cunha, P. Eames, Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review, 177, 2016, 227-238 pp.
- [9] T.M.I. Mahlia, T.J. Saktisahdan, A. Jannifar, M.H. Hasan, H.S.C. Matseelar, A review of available methods and development on energy storage; technology update, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 33, 2014, pp. 532-545.
- [10] Y. Hou, R. Vidu, P. Stroeve, Solar Energy Storage Methods, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 50, Iss. 15, 2011, pp. 8954-8964.
- [11] I. Sarbu, C. Sebarchievici, A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage, *Sustainability*, Vol. 10, Iss. 1, 2018

- [12] A.H. Abedin, A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems, *The Open Renewable Energy Journal*, Vol. 4, Iss. 1, 2011, pp. 42-46.
- [13] K. Pielichowska, K. Pielichowski, Phase change materials for thermal energy storage, *Progress in Materials Science*, Vol. 65, 2014, pp. 67-123.
- [14] P. Pinel, C.A. Cruickshank, I. Beausoleil-Morrison, A. Wills, A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, Iss. 7, 2011, pp. 3341-3359.
- [15] Y. Tian, C.Y. Zhao, A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications, *Applied Energy*, Vol. 104, 2013, pp. 538-553.
- [16] M. Liu, N.H. Steven Tay, S. Bell, M. Belusko, R. Jacob, G. Will, W. Saman, F. Bruno, Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53, 2016, pp. 1411-1432.
- [17] B. Xu, P. Li, C. Chan, Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments, *Applied Energy*, Vol. 160, 2015, pp. 286-307.
- [18] P.B. Salunkhe, P.S. Shembekar, A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, Iss. 8, 2012, pp. 5603-5616.
- [19] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, Iss. 2, 2010, pp. 615-628.
- [20] A. Hoshi, D.R. Mills, A. Bittar, T.S. Saitoh, Screening of high melting point phase change materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based on CLFR, *Solar Energy*, Vol. 79, Iss. 3, 2005, pp. 332-339.
- [21] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, Iss. 3, 2011, pp. 1675-1695.